



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

**VLIV CEMENTÁŘSKÝCH ODPRAŠKŮ NA TENDENCI KE
VZNIKU TRHLIN ALKALICKY AKTIVOVANÉ STRUSKY PŘI
VYSYCHÁNÍ**

EFFECT OF CEMENT BYPASS DUST ON CRACKING TENDENCY OF ALKALI-ACTIVATED SLAG DURING DRYING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marie Krejčová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1334/2018 Akademický rok: 2018/19
Ústav: Ústav chemie materiálů
Studentka: **Marie Krejčová**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů
Vedoucí práce: **Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.**

Název bakalářské práce:

Vliv cementářských odprašků na tendenci ke vzniku trhlin alkalicky aktivované strusky při vysychání

Zadání bakalářské práce:

1. Literární rešerše
2. Vytipování vhodných těles pro pozorování praskání AAS při vysychání
3. Příprava vzorků na bázi AAS a cementářských bypassových odprašků
4. Pozorování trhlin a rozměrových změn připravených vzorků

Termín odevzdání bakalářské práce: 24.5.2019:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Marie Krejčová
student(ka)

Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.
vedoucí práce

doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2019

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem bypassových cementářských odprašků na vznik trhlin v alkalicky aktivované strusce. Značné smrštění a tvorba trhlin brání většímu využití alkalicky aktivované strusky. Byly sledovány délkové změny a pevnosti směsí s různými dávkami bypassových cementářských odprašků při různém ošetřování. U těchto směsí byl pozorován vznik trhlin, jejichž množství bylo vyhodnocováno obrazovou analýzou. Bylo zjištěno, že přidavkem odprašků je možné snížit množství trhlin. Ošetřování trámeček ve vlhkém prostředí vede ke snížení množství trhlin, zejména při dlouhodobém ošetřování. Z důvodu zlepšení pevností v tahu za ohybu a v tlaku je vhodnější použití odprašků jako náhrady za část kameniva než jimi částečně nahrazovat strusku.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the influence of bypass cement dust on cracking of alkali activated slag. Significant shrinkage and cracking prevent greater use of alkali activated slag. The length changes and strength of the mixtures with different amount of bypass cement dust were measured at various curing conditions. In these mixtures, cracks were observed and their amount was evaluated by image analysis. It has been found that the addition of dust can reduce the amount of cracks. Treating the prisms in a humid environment leads to a reduction of cracks, especially during long-term treatment. In order to improve flexural and compressive strength, it is preferable to use dust as a replacement for part of aggregates and not as a partial slag replacement.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bypassové cementářské odprašky, smrštění, trhliny, obrazová analýza, pevnosti, podmínky ošetřování

KEYWORDS

Bypass cement dust, shrinkage, cracks, image analysis, strength, curing conditions

KREJČOVÁ, Marie. *Vliv cementářských odprašků na tendenci ke vzniku trhlin alkalicky aktivované strusky při vysychání*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113641>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Vlastimil Bílek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že jsem všechny použité literární zdroje správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu práce Ing. Vlastimilu Bílkovi, Ph.D za odborné vedení a pomoc při vypracování této bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Jakubu Palovčíkovi za analýzu vzorků na skenovacím elektronovém mikroskopu a Ing. Lucii Galvánkové za rentgenovou difrakční analýzu.

OBSAH

1	ÚVOD	5
2	TEORETICKÁ ČÁST.....	6
2.1	Alkalicky aktivované materiály	6
2.2	Struska	6
2.2.1	Rozdělení strusky	6
2.2.2	Složení strusky	7
2.2.3	Vysokopeční struska	8
2.2.4	Ocelářenská struska.....	9
2.3	Alkalické aktivátory	10
2.3.1	Vodní sklo	10
2.3.2	Alkalická aktivace strusky	10
2.4	Bypassové cementářské odprašky	11
2.5	Smrštění.....	12
2.5.1	Plastické smrštění.....	12
2.5.2	Autogenní smrštění	12
2.5.3	Karbonatační smrštění.....	12
2.5.4	Smrštění vysycháním	13
2.5.5	Trhliny.....	13
2.5.6	Možnosti omezení smrštění a vzniku trhlin	14
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	16
3.1	Použité suroviny	16
3.1.1	Granulovaná vysokopeční struska.....	16
3.1.2	Bypassové cementářské odprašky	16
3.1.3	Aktivátor.....	17
3.1.4	Kamenivo	17
3.1.5	Cement	17
3.2	Příprava zkušebních těles	17
3.2.1	Značení směsí	17
3.2.2	Příprava vzorků	18
3.2.3	Typy ošetřování.....	18
3.3	Měření délkových změn	20
3.4	Měření pevností	20

3.5	Karbonatace	20
3.6	Vyhodnocování trhlin	20
4	VÝSLEDKY A DISKUZE	22
4.1	Vytipování vhodných těles pro vyhodnocování trhlin	22
4.2	Směsi s 8 % Na_2O a různou dávkou bypassových cementářských odprašků.....	25
4.2.1	Bypassové cementářské odprašky nahrazující strusku.....	27
4.2.2	Bypassové cementářské odprašky nahrazující kamenivo	31
4.3	Směsi s 4 % a 8 % Na_2O a 40 % bypassových cementářských odprašků	35
4.4	Směsi při použití aktivátoru s křemičitým modulem sníženým na hodnotu 0,5	42
4.5	Směsi s dalšími příměsmi	50
5	ZÁVĚR.....	53
6	POUŽITÉ ZDROJE	54

1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem bypassových cementářských odprašků na vznik trhlin v alkalicky aktivované strusce. Značné smrštění a tvorba trhlin brání většímu využití alkalicky aktivované strusky jako stavebního materiálu. Využití alkalicky aktivované strusky by z ekologického hlediska bylo šetrnější než použití portlandského cementu. Při výrobě cementu je totiž potřeba značné množství energie na rozklad vápence, s čímž souvisí uvolňování velkého množství oxidu uhličitého. Tyto problémy při využití alkalicky aktivované strusky odpadají, jelikož struska vzniká jako vedlejší produkt při výrobě železa. Dalším přínosem by navíc byla možnost širšího uplatnění cementářských odprašků, které mají v současné době jen omezené využití.

V této práci byl sledován vliv bypassových cementářských odprašků na vlastnosti alkalicky aktivované strusky, především na tvorbu trhlin způsobenou výrazným smrštěním. Potlačením smrštění alkalicky aktivované strusky se zabývá celá řada vědeckých prací, většinou se ale nezabývají vznikem trhlin a hodnocením jejich množství. Proto jedním z cílů této práce je vytypovat vhodná tělesa k pozorování trhlin a jejich kvantifikace.

Tato práce přímo souvisí s evropským projektem č. 734833 “GeoDust”, kde je Centrum materiálového výzkumu na Fakultě chemické hlavním koordinátorem. Tento projekt se právě využitím odprašků v alkalicky aktivovaných systémech zabývá.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Alkalicky aktivované materiály

Alkalicky aktivované materiály je označení používané pro anorganické polymerní systémy vznikající alkalickou aktivací aluminosilikátů. K přípravě alkalicky aktivovaných materiálů se používají pucolány nebo latentně hydraulické látky. Tyto látky podléhají hydratačním reakcím až po přidání vhodného aktivátoru a vody. Nejčastěji používané jsou vysokopecní strusky, popílky, metakaolíny nebo přírodní pucolány. Jako aktivátory se používají hydroxidy, alkalické křemičitany nebo uhličitany [1].

2.2 Struska

Ocel patří mezi základní konstrukční materiály, její výroba je však vysoce energeticky náročná a vzniká při ní velké množství vedlejších produktů. Z objemového hlediska je nejvýraznější produkce strusky. Železo a ocel nelze vyrobit bez vzniku strusky. Struska vzniká z hlušiny kovonosných rud, struskotvorných přísad, popelovin v koksu a dalších nečistot.

Primární funkcí strusky ve vysoké peci je zabezpečit redukci oxidů železa a manganu přítomných v surovinách a zabezpečit odsíření kovové lázně. Hlavním faktorem ovlivňujícím produkci strusky je obsah balastních složek v kovonosné rudě. Při výrobě jedné tuny surového železa vznikne 400–600 kg strusky, v případě nekvalitní rudy může množství strusky přesáhnout 1 000 kg [2].

2.2.1 Rozdělení strusky

Zpracování strusky se v jednotlivých metalurgických podnicích liší. K dosažení co nejvyšší hodnoty strusky se provádí mnoho operací například odseparování kovových podílů, drcení, třídění podle velikostních frakcí nebo řízené chlazení. Vysokopecní strusku lze využít jako kamenivo nebo jako surovinu vhodnou při výrobě cementu, minerální vaty, skla a dalších produktů. Méně obvyklým využitím strusky je použití strusky jako substrátu pro hydroponicky pěstovanou zeleninu [2; 3].

Strusku z výroby železa můžeme rozdělit na vysokopecní a ocelářenskou, která se dále rozděluje na pecní a pánevovou (viz Tab. 1).

Tab. 1: Základní druhy strusek z metalurgie železa a oceli a základní struskové produkty [2]

Pochod		Agregát	Struska	Struskový produkt
Výroba surového železa		Vysoká pec	Vysokopecní struska	Umělé hutní kamenivo
				Granulovaná vysokopecní struska
Výroba oceli	Primární metalurgie	Kyslíkový konvertor	Ocelářenská struska – pecní	Umělé těžké kamenivo
		Elektrická oblouková pec		
		Tandemová pec		
		Siemens-Martinská pec		
	Sekundární metalurgie	Licí pánev	Ocelářenská struska – pánevová	Rekultivační směs/skládkování

2.2.2 Složení strusky

Do strusky přechází veškeré nečistoty obsažené v železné rudě a koksu. Obsah nečistot se kontroluje z důvodu možného zvýšení teploty tavení směsi, což je ekonomicky nevýhodné. Proto se složení upravuje přidávkou korigující směsi a výsledné složení strusky se v čase příliš neliší [4].

Obvyklé chemické složení strusek z výroby železa je uvedeno v tab. 2. Chemické složení strusky se vyvíjí po celou dobu, kdy se nachází ve vysoké peci. Z vysoké pece se struska dostává při odpichu, od roztaveného železa se velmi dobře odděluje díky své nižší hustotě. Teplota strusky ve vysoké peci může dosahovat až 1 550 °C [2].

Existují i neželezné strusky vznikající například při výrobě fosforu, olova, niklu, zinku, mědi a dalších kovů. Využití strusky z výroby olova je problematické z důvodu její toxicity [5; 6].

Tab. 2: Chemické složení vysokopecní a ocelářenské strusky [2]

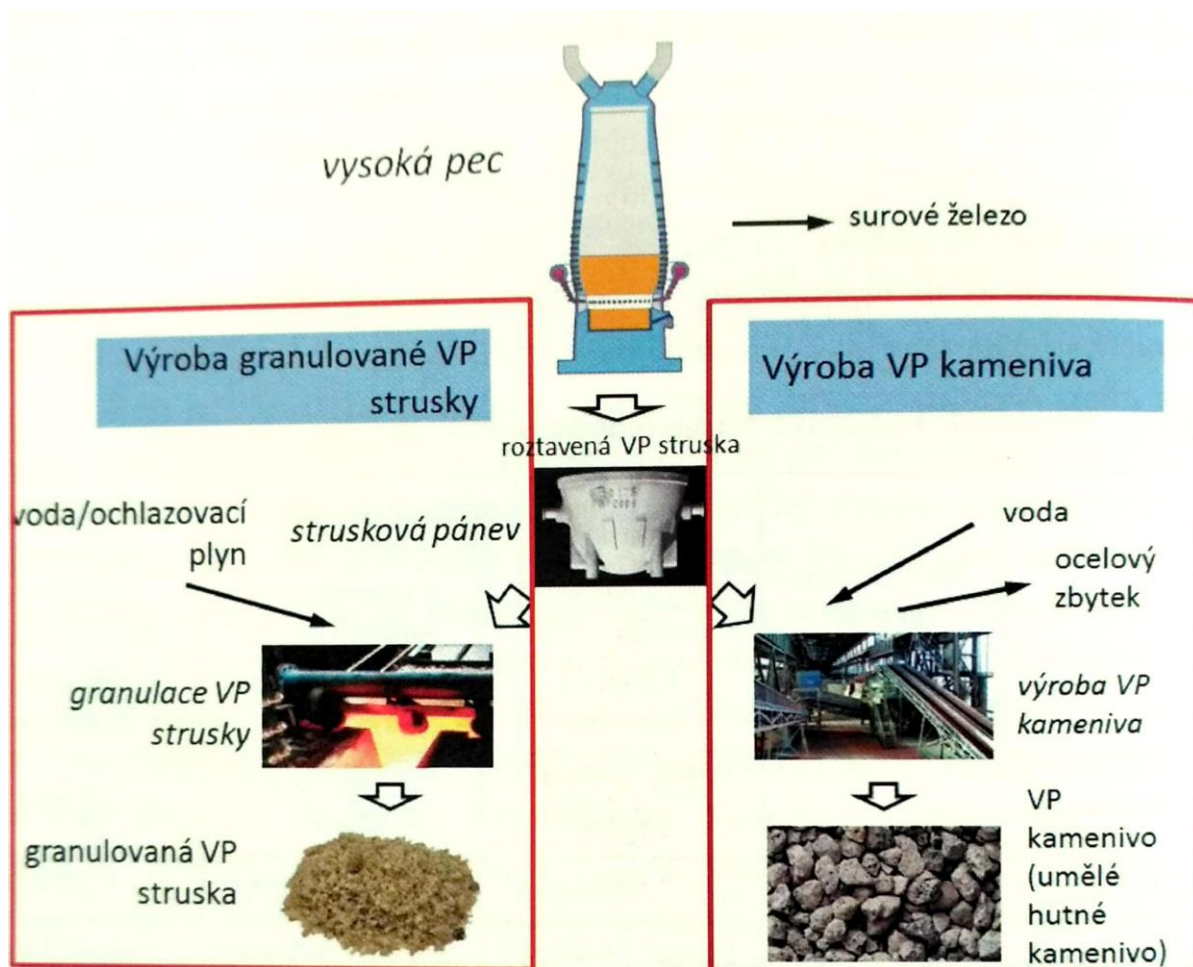
Struska	Složka (hm. %)					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	FeO+Fe ₂ O ₃
Vysokopecní	35–38	34–38	6–9	10–14	0,5–2	0,5–1
Elektrická oblouková pec-uhlíkaté oceli	35–69	9–20	2–9	5–15	3–8	15–30
Elektrická oblouková pec-legované oceli	39–45	24–32	3–8	8–15	0,4–2	1–6
Kyslíkový konvertor	30–55	8–20	1–6	5–15	2–8	10–35
Pánvová	30–60	2–35	5–35	1–10	0–5	0,1–15

2.2.3 Vysokopecní struska

Fázové složení vysokopecní strusky je závislé na chemickém složení a na rychlosti chlazení. Při rychlém chlazení struska tuhne v amorfním stavu, především díky přítomnosti oxidu křemičitého. Aby struska ztuhla v amorfním stavu, lije se roztavená struska do vody (viz Obr. 1). Na počátku chlazení musí mít struska teplotu vyšší, než je kritická teplota. Vzniklý produkt se nazývá granulovaná vysokopecní struska. Tento proces chlazení se označuje jako granulace strusky. Granulovaná vysokopecní struska má obsahovat minimálně 85 % amorfní fáze, zbytek je tvořen krystalickými fázemi. Nejčastěji se zde vyskytují minerály merwinit, melilit, akermanit, monticellit, α , β -C₂S. Z důvodu využitelnosti strusky se sleduje obsah SiO₂, CaO, Al₂O₃ a MgO. [2]

Sleduje se poměr zásaditých (CaO + MgO) a kyselých (SiO₂ + Al₂O₃), který se označuje jako bazicita strusky. Granulovaná vysokopecní struska patří mezi tzv. technogenní pucolány a vykazuje latentní hydraulicitu.

Při pomalém chlazení nedochází k tvorbě skelné fáze. Nejčastěji se vyskytující minerály jsou gelenit, akermanit, wollastonit, γ -C₂S, melilit rankinit a monticellit. Vlastnosti pomalu chladnoucí strusky se zcela liší od vlastností granulované vysokopecní strusky. Z pomalu chladnoucí strusky se vyrábí umělé kamenivo [2].



Obr. 1: Schéma zpracování vysokopecní strusky [2]

2.2.4 Ocelářenská struska

Ocelářenská struska vzniká při úpravě surového železa v primární a sekundární metalurgii. Struska vyprodukovaná v různých ocelářských agregátech má různé vlastnosti a složení. Ocelářenská struska obsahuje na rozdíl od vysokopecní strusky více oxidů železa a CaO, naopak má nižší obsah Al_2O_3 . Mineralogické složení je velmi variabilní, obsahuje například olivín, merwinit, C_3S , gehlenit, C_2F , cristobalit, CaO, MgO a mnoho dalších. Využití ocelářenských strusek je horší než u vysokopecní strusky, využívá se přibližně 65 %, zbytek je ukládán na skládky, což je finančně nevýhodné. Část ocelářenské strusky se recykluje ve vysoké peci, důvodem je vysoký obsah železa a částečná náhrada struskotvorných přísad. Tento způsob recyklace je limitován obsahem fosforu ve strusce, obsah fosforu je hlídán z důvodu nepříznivého ovlivnění vlastností železa. Ocelářenská struska se využívá k výrobě umělého kameniva. Problémem využití ocelářenské strusky je její objemová nestálost v případě, že struska obsahuje větší množství volného CaO a MgO. Tyto oxidy snadno podléhají hydrataci, při které mění svůj objem, což způsobuje snížení pevností. Další objemové změny způsobuje transformace C_2S z modifikace β na γ . Problém s objemovou nestabilitou umělého kameniva z ocelářenské strusky se projevil například při stavbě dálnice D47. [2; 7; 8; 9]

2.3 Alkalické aktivátory

Alkalické aktivátory umožňují hydrataci hlinitokřemičitanových prekurzorů, což umožňuje vznik pojiva. K alkalické aktivaci se nejčastěji používají hydroxidy alkalických kovů (MOH), křemičitany ($M_2O \cdot nSiO_2$), soli slabých kyselin (M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4), soli silných kyselin (M_2SO_4), hlinitany ($M_2O \cdot nAl_2O_3$), hlinitokřemičitany ($M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6) SiO_2$), kde M obvykle představuje Na, případně K v ojedinělých případech Li, Cs, Rb [5].

2.3.1 Vodní sklo

Jako vodní sklo se nejčastěji označují koloidní vodné roztoky alkalických křemičitanů, méně často se toto označení používá i pro tuhé taveniny alkalických křemičitanů, ty se obvykle označují jako sodnokřemičité frity. Důležitou vlastností vodního skla je křemičitý modul (M_s), což je molární poměr SiO_2 a Na_2O . Hodnota 1,032 je poměr molárních hmotností těchto oxidů a slouží k přepočtu hmotnostních zlomků na molární. Rozpustná vodní skla mají křemičitý modul v rozmezí 1,2 až 4.

$$M_s = 1,032 \cdot \frac{w(SiO_2)}{w(Na_2O)}, \quad (1)$$

Nejběžněji vyráběné je sodné vodní sklo, kterého se vyrábí přibližně dvacetkrát více než draselného, lithné vodní sklo se vyrábí pouze v malých množstvích. Křemičitan sodný se vyrábí tavením sklářského písku a uhličitanu sodného v kontinuální vanové peci, při teplotě 1 300–1 400 °C probíhá reakce:

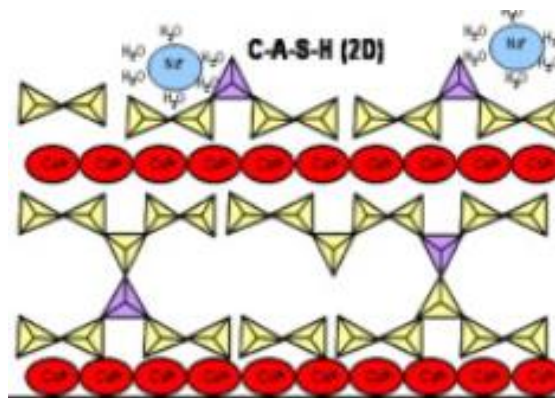


Vzniklá tavenina se chladí vodou, čímž vzniknou granule křemičitanu sodného, které obsahují přibližně 76 % SiO_2 a 23 % Na_2O . Vodný roztok se získává rozpuštěním pevného křemičitanu v autoklávu, kam se pod tlakem zavádí vodní pára. Při průmyslové výrobě pec denně vyrobí kolem 100 tun křemičité frity [10; 11].

2.3.2 Alkalická aktivace strusky

Mechanismus alkalické aktivace nebyl dosud zcela přesně objasněn. Jedním z důvodů je, že pro přípravu alkalicky aktivovaných materiálů lze použít různé materiály, které mohou být aktivované celou řadou různých aktivátorů. Hydratační produkty se proto mění v závislosti na použitých materiálech [5].

Při alkalické aktivaci strusky dochází vlivem vysokého pH k rozrušení vazeb Ca–O Si–O a Al–O. Atomy hliníku se zaměňují za atomy křemíku v původní struktuře, tím dojde ke vzniku hlinitokřemičitanu, který podporuje vývoj pevností. Pomalu se vytvoří CSH gel, případně CAH nebo CASH gel (viz Obr. 2) [12].



Obr. 2: Model struktury CASH gelu, červeně jsou zobrazeny vápenaté ionty, modře sodíkové ionty obklopené molekulami vody, žlutě křemičitanové tetraedry a fialově hlinitanové tetraedry [13]

2.4 Bypassové cementářské odprašky

Z důvodu snížení nákladů na výrobu cementu se jako palivo používají tuhá alternativní paliva, což jsou vytríděné a upravené odpady. V cementárnách se mohou spalovat směsné plasty, textil, koberce, pryž, pneumatiky, papír, dřevotříska a další [14]. Použití tuhých alternativních paliv přináší problémy v podobě látek, které jsou jejich součástí, například sloučeniny alkálií, chloru, síry. Při teplotách, kterých je dosahováno při výpalu slínku, přechází tyto látky do plynné formy a odchází z pece. Při poklesu teploty přechází zpět do kapalné a nakonec do pevné fáze, což způsobuje nalepování materiálu v šachtě za pecí a ve spodních částech výměníku. Část usazeného materiálu je při průchodu surovin do pece strženo a postupují dále do pece, kde opět dojde k odpaření a celý proces se opakuje. Aby se tomuto procesu zabránilo, provádí se odtah části pecních plynů z přechodového kusu rotační cementářské pece. Pecní plyny se rychle zchladí z teploty cca 1 000 °C na teplotu 300–400 °C, tím dojde ke kondenzaci alkálií na prachových částicích. Zavedení bypassu je nutné v případě, že na vstupu do pece je obsah alkálií vyšší než 2 %, obsah chloru vyšší než 0,02 % případně obsah SO₃ vyšší než 0,5 % [15; 16].

Vzniklé bypassové odprašky lze rozdělit na dvě skupiny. Hrubší částice větší než 70 µm mají nízký obsah alkálií a obsahují především slínkový a surovinový prach. Tyto částice je možné vrátit zpět do výroby. Jemnější frakce obsahuje slínkový a surovinový prach s vysokým obsahem alkálií, proto není příliš vhodná pro použití do cementu. Jejich přidávání do cementu musí být pečlivě kontrolováno, aby nedošlo ke zhoršení vlastností z důvodu přítomnosti Na, K nebo Cl. Maximální množství těchto prvků ve výsledném cementu je dáno normami. Například v České republice je obsah chloridů dle ČSN EN 197-1 omezen na 0,1 %. [15; 16].

Mezi přínosy zavedení bypassu patří možnost využívat paliva s vyšším obsahem chloru. Chod pece se stává stabilnějším z důvodu omezení vzniku nálepků, které se musí pracně odstraňovat, což znamená odstávku pecní linky. Díky odtahu škodlivých látek se zlepšuje kvalita vyráběného slínku. Snižuje se poškození zařízení z důvodu přítomnosti těchto látek. Zařazení

bypassu má i negativní vlivy, mezi které patří zvýšení spotřeby energie na výpal slínku, zvýšení nároků na obsluhu a údržbu zařízení [16; 17].

2.5 Smrštění

Snížení objemu za konstantní teploty bez vnějšího zatížení se nazývá smrštění. Smrštění je velmi důležitá vlastnost materiálu a má významný vliv na dlouhodobé využití materiálu. Smrštění lze rozdělit na autogenní smrštění, plastické smrštění, karbonatační smrštění a smrštění vysycháním. Největší vliv na celkové smrštění alkalicky aktivované strusky má autogenní smrštění a smrštění vysycháním, vliv karbonatačního smrštění není tak významný. Smrštění ovlivňuje množství vnitřních i vnějších faktorů. Mezi vnitřní faktory patří vlastnosti strusky a aktivátoru, dávka aktivátoru, vodní součinitel a stupeň hydratace. Mezi vnější faktory se řadí teplota, relativní vlhkost, rychlost a čas vysychání [5; 22].

2.5.1 Plastické smrštění

Plastické smrštění nastává hned po namíchání, kdy je materiál ještě částečně tekutý. Plastické smrštění je způsobené ztrátou vody z povrchu zpracovávaného betonu. Dochází ke smrštění ve všech směrech. Pokud je odpařování vody rychlé, dochází k migraci vody z vnitřku betonu pomocí kapilárních sil. Při vyšším vodním součiniteli je plastické smrštění větší [4; 18; 19].

2.5.2 Autogenní smrštění

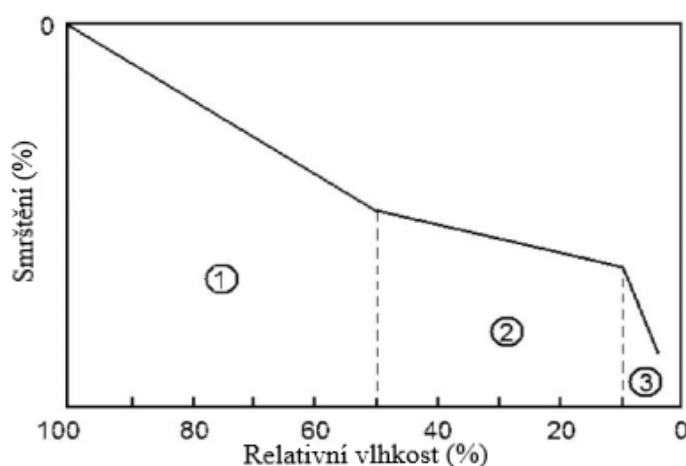
Autogenní smrštění jsou objemové změny způsobené průběžnou hydratací pojiva za autogenních podmínek, tedy když systém nevyměňuje hmotu s okolím. Důležitou roli zde hraje smrštění způsobené samovysycháním, protože voda se neodpařuje pryč, ale chemicky se váže do struktury hydratačních produktů. Tím se voda v pórech spotřebovává, což je doprovázeno smrštěním. Tento proces probíhá v celém objemu betonu. Kromě toho mají hydratační produkty menší objem než původní pojivo, což také k autogennímu smrštění přispívá. V případě nízkého vodního součinitele může z důvodu autogenního smrštění dojít ke vzniku trhlin uvnitř betonového prvku. Tomuto jevu lze zabránit ošetřováním pod vodou. Autogenní smrštění alkalicky aktivované vysokopecní strusky je vyšší než u portlandského cementu. Při stejné dávce aktivátoru je autogenní smrštění vyšší při aktivaci vodním sklem než při aktivaci hydroxidem sodným [4; 5; 20].

2.5.3 Karbonatační smrštění

Karbonatační smrštění nastává při kontaktu hydratačních produktů s CO_2 obsaženým ve vzduchu. V důsledku reakce s CO_2 se snižuje pH materiálu. Karbonatace způsobuje odvápnění CSH gelu. Při použití vodního skla jako aktivátoru způsobuje karbonatace zhoršení soudržnosti, zvýšení pórovitosti a snížení mechanických vlastností. Při použití NaOH může dojít ke zlepšení mechanických vlastností [5; 21].

2.5.4 Smrštění vysycháním

Smrštění vysycháním je způsobeno odpařováním vody z materiálu. Je to nejvýznamnější typ smrštění. Na smrštění vysycháním má značný vliv relativní vlhkost prostředí. Tento vliv lze rozdělit do tří fází v závislosti na relativní vlhkosti (viz Obr. 3). V první fázi se odpařuje voda z pórů, ve druhé fázi dochází ke ztrátě vody z povrchu CSH, v třetí fázi dochází ke ztrátě vody ze struktury CSH. Na velikost smrštění má značný vliv velikost a distribuce pórů materiálu [5; 18].



Obr. 3: Vztah mezi smrštěním a relativní vlhkostí [5]

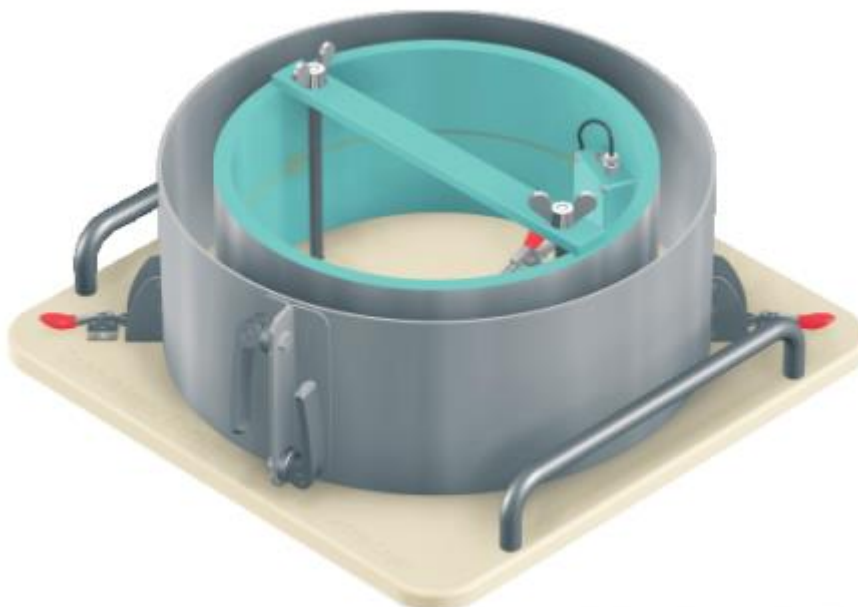
Alkalicky aktivované materiály vykazují vyšší smrštění vysycháním než portlandský cement, tyto rozdíly jsou ještě patrnější při poklesu relativní vlhkosti. Při použití vodního skla je smrštění vyšší, než když se jako aktivátor použije NaOH, Na₂CO₃ nebo Na₃PO₄ [5].

2.5.5 Trhliny

Uvnitř betonu dochází ke vzniku napětí z důvodu nerovnoměrného smrštění, nejprve dochází ke smrštění na povrchu, později dochází ke smrštění jádra prvku. V raném věku jsou trhliny způsobeny především autogenním smrštěním. Dalším důvodem ke vzniku napětí je, že přítomnost kameniva omezuje potenciální smrštění. Když je vnitřní napětí příliš velké, dojde ke vzniku trhliny. Tvorba trhlin je problémem nejen z hlediska estetického. Trhliny snižují pevnost materiálu a usnadňují pronikání korozivních látek do celého objemu, tím zhoršují jeho životnost.

Vzhledem k tomu, že alkalicky aktivované materiály vykazují vyšší smrštění než portlandský cement, jsou i náchylnější ke vzniku trhlin [5; 23; 24].

K analýze trhlin se velmi často používá test, při kterém se materiál nalije do mezikruží zařízení pro měření tendence k praskání (viz Obr. 4). Vnitřní kruh slouží k omezování smrštění. Přístroj navíc měří tlakové namáhání vytvořené smrštěním měřeného materiálu. Praskání vzorku potom lze indikovat jako náhlý pokles napětí ocelového kroužku [27; 28].



Obr. 4: Zařízení na měření tendence k praskání systému [28]

2.5.6 Možnosti omezení smrštění a vzniku trhlin

Podmínky vytvrzování ovlivňují smrštění alkalicky aktivované strusky. Vliv má nejen typ ošetřování, ale i doba ošetřování. Při různém ošetřování se kontroluje především vlhkost a teplota prostředí. Delší doba ošetřování se obvykle projeví snížením smrštění. Při použití vyšší teploty se snižuje smrštění a urychluje se vývoj pevnosti, ale z dlouhodobého hlediska je pevnost v tlaku nižší než při vytvrzování při laboratorní teplotě. Při vyšší relativní vlhkosti se snižuje velikost smrštění [22].

Velmi zásadní vliv na smrštění mají aktivátory. Jak již bylo zmíněno, při použití vodního skla je smrštění vyšší, než když se jako aktivátor použije NaOH , Na_2CO_3 nebo Na_3PO_4 [5]. Zvýšení obsahu SiO_2 a Na_2O vede ke zvýšení smrštění stejně jako použití vodního skla s vyšším křemičitým modulem a také ke zvýšení pevnosti. Smrštění lze redukovat přidávkou dalšího prekursoru, například popílkem nebo křemičitým úletem. Použití takovýchto směsí vede ke vzniku jiných hydratačních produktů, což může potlačit smrštění [24].

Další možností, jak redukovat smrštění, je použití expanzivní přísady například pálené vápno nebo MgO . Expanzivní přísady snižují spotřebu vody v průběhu hydratace a zlepšují odolnost proti deformaci při sušení [22].

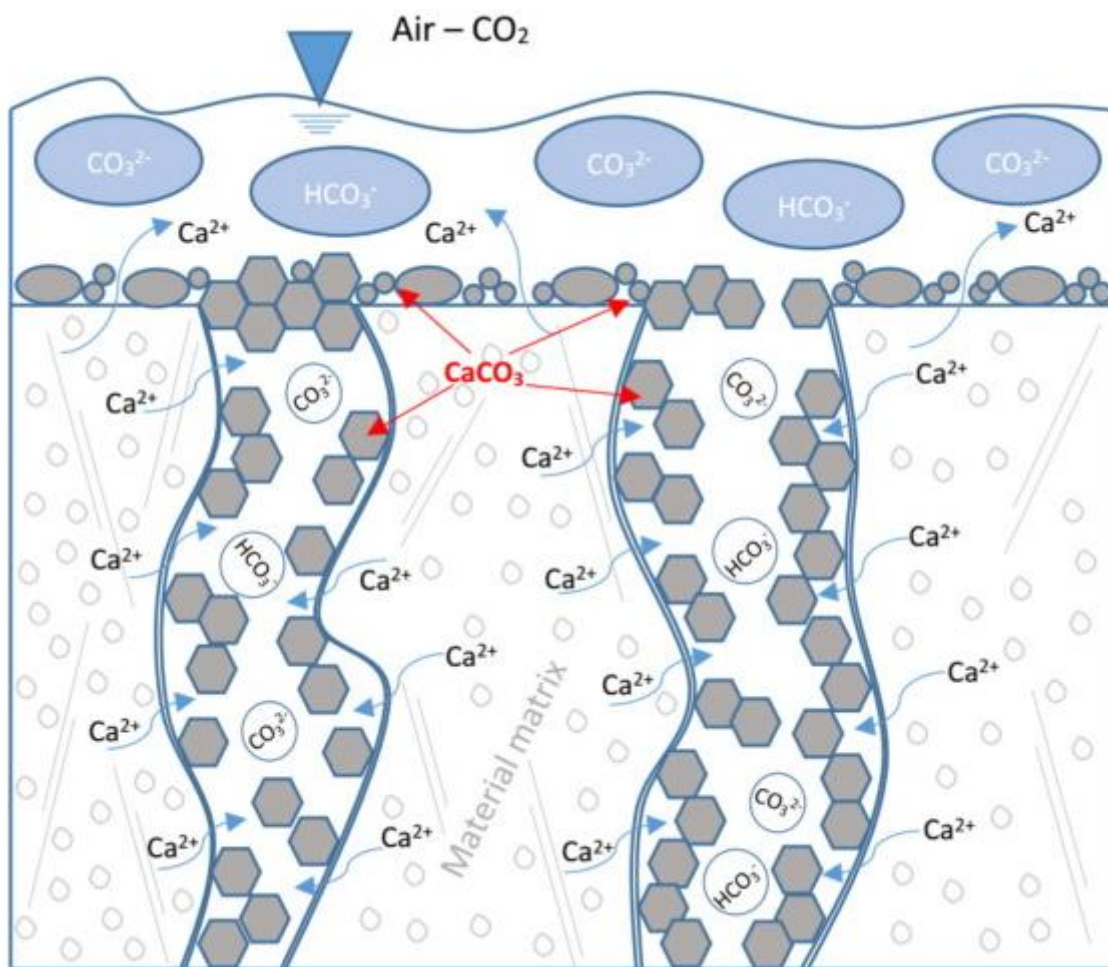
Protismršťovací přísady jsou organické povrchově aktivní látky. Vhodně zvolená protismršťovací přísada dokáže smrštění snížit na úroveň portlandského cementu. Do alkalicky aktivovaných materiálů se používají například přísady na bázi polyethylenglykolu [22; 25].

Zásadním problémem je také prudký pokles vnitřní relativní vlhkosti, což způsobuje autogenní smrštění. Vnitřní relativní vlhkost lze zvýšit metodou vnitřního vytvrzování. Tato technika poskytuje vytvrzovací vodu tím, že se část kameniva nahradí předem smáčeným lehkým

kamenivem. Tato metoda dokáže snížit autogenní smrštění, ale problémem je zhoršení mechanických vlastností [24].

Smrštění lze také potlačit přidavkem vláknité výztuže [22].

U materiálů na bázi cementu i alkalicky aktivované strusky byla také pozorována schopnost samohojení malých trhlin. Na samohojení se nejvýrazněji podílí CaCO_3 , který v trhlinách vzniká reakcí s CO_2 (viz Obr. 5). Tento proces probíhá v materiálu přirozeně, ale je také možné ho uměle podpořit například pomocí chemických přísad nebo bakterií [26].



Obr. 5: Mechanismus samohojení materiálu [26]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Použité suroviny

3.1.1 Granulovaná vysokopecní struska

K přípravě vzorků byla použita velmi jemně mletá granulovaná vysokopecní struska od společnosti KOTOUČ ŠTRAMBERK, spol. s r.o.. Oxidové složení stanovené rentgenovou fluorescencí je uvedeno v tab. 3. Fázové složení určené rentgenovou krystalografií je uvedeno v tab. 4. Medián velikosti částic byl 10,03 μm . Blaineův měrný povrch byl 400 m^2/kg .

Tab. 3: Oxidové složení použité strusky

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Mn ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅
w [% hm.]	39,6	38,9	8,9	0,27	8,8	0,39	0,40	1,4	0,83	0,32	0,01

Tab. 4: Fázové složení použité strusky

	Amorfní	Kalcit	Melilit	Akermanit	Merwinit
w [% hm.]	70,7	15,5	2,0	8,1	3,8

3.1.2 Bypassové cementářské odprašky

Byly použity bypassové cementářské odprašky z cementárny Horné Srnie (CEMMAC, a.s.) Oxidové složení použitých bypassových odprašků stanovené rentgenovou fluorescencí je uvedeno v tab. 5. Fázové složení bylo určeno rentgenovou krystalografií (viz Tab. 6).

Tab. 5: Oxidové složení bypassových cementářských odprašků

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cl
w [% hm.]	25.9	6.5	2.5	1.6	0.48	0.44	17.1	5.2	0.14	0.08	10.3

Tab. 6: Fázové složení bypassových cementářských odprašků

	Amorfní	Volný CaO	Sylvín	Arkanit	Larnit	Křemen	Alunit
w [% hm.]	44,1	15,7	19,8	8,8	10,0	0,5	1,1

3.1.3 Aktivátor

Používaným aktivátorem bylo sodné vodní sklo, které mělo křemičitý modul 1,86. Složení je uvedeno v tab. 7. V případě, že byl použit křemičitý modul 0,5, byl k vodnímu sklu těsně před mícháním přidán 50% roztok NaOH.

Tab. 7: složení vodního skla

	Na ₂ O	SiO ₂	H ₂ O
w [% hm.]	16,65	30,10	53,25

3.1.4 Kamenivo

Do betonů bylo použito přírodní těžené kamenivo z pískovny Žabčice. Pro přípravu vzorků byly použity frakce 0–4 mm a 4–8 mm. Dále byl použit normalizovaný křemičitý písek s velikostí částic 0–2 mm.

3.1.5 Cement

Pro porovnání výsledků pozorovaných na vzorcích s alkalicky aktivovanou matricí byly připraveny také vzorky s běžným portlandským cementem (CEM I 42,5R) z produkce cementárny v Mokré (Českomoravský Cement, a.s.).

3.2 Příprava zkušebních těles

3.2.1 Značení směsí

Pro jednoduchou orientaci v připravených vzorcích byl použit jednotný systém značení, ze kterého lze poznat složení vzorku. Z označení lze vyčíst dávku aktivátoru, množství bypassových cementářských odprašků a vodní součinitel. Dávka aktivátoru je uváděná v procentech Na₂O vůči hmotnosti strusky. Dávka odprašků uvádí procentuální náhradu strusky za odprašky. Vodní součinitel udává množství vody vůči strusce případně strusce s odprašky. V případě betonů byl použit ještě druhý způsob značení, kde bylo před dávkou odprašků použito znamínko +, což znamená, že ke strusce bylo přidáno uvedené množství odprašků a množství kameniva bylo sníženo o 70 % hmotnosti odprašků (odprašky byly ze 70 % nerozpustné). V tomto případě byl vodní součinitel počítán pouze vzhledem ke strusce.

Příklady značení:

8D-20_0,35 dávka aktivátoru je 8 % Na₂O, 20 % strusky bylo nahrazeno odprašky a vodní součinitel je 0,35

8D+40_0,46 dávka aktivátoru je 8 %, odprašky byly přidány v množství odpovídajícímu 40 % strusky, ale nahrazují kamenivo, vodní součinitel je 0,46

3.2.2 Příprava vzorků

Byly připraveny pasty, na kterých byly pozorovány délkové a hmotnostní změny. Dále byly připraveny betony, na kterých byl pozorován vznik trhlin, vývoj pevností, případně délkové a hmotnostní změny.

Pasty byly připravovány v míchačce Beton system s přednastavenými cykly míchání. Před vsypáním do míchačky byly samostatně promíchány jak suché materiály, tak i kapalné složky směsi. Po promíchání směsi v míchačce byla pasta nalita do forem 25×25×285 mm vymazaných vazelínou a opatřených kovovými kontakty pro měření délkových změn. Část pasty byla umístěna do ocelové formy čtvercového tvaru s trnem uprostřed (Obr. 6). Naplněné formy byly vloženy do polyethylenových sáčků, tedy uchovávány v autogenních podmínkách.



Obr. 6: Forma na pozorování trhlin na čtvercových vzorcích o straně 5 cm

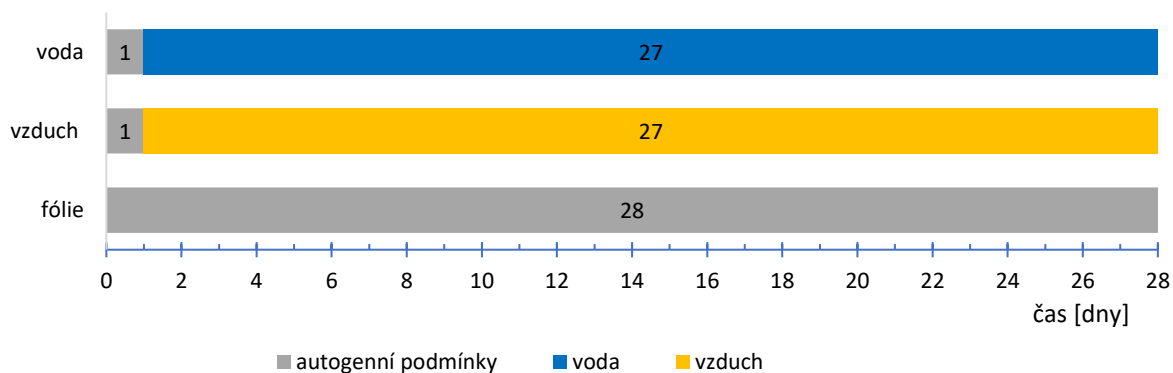
Do betonů byly použity frakce 0–4 mm a 4–8 mm přírodního kameniva. Poměr kameniva ku pojivu byl 3 : 1. Vzorky betonů byly míchány kuchyňským robotem KitchenAid. Postup byl stejný jako v případě past s tím rozdílem, že se rychlosti míchání musí nastavovat ručně. Po umíchání se směsi nalily do vymazaných ocelových forem 40×40×160 mm s kontakty, v případě vzorků určených na focení se směsi lily do nevymazaných plastových forem o stejných rozměrech. Výhodou plastových forem je, že je není třeba vymazávat vazelínou. Ve vazelíně zůstávají tahy štětcem, což znemožňuje obrazovou analýzu.

Naplněné formy se nechaly několik minut stát, aby došlo k zavadnutí povrchu. Poté byly vloženy do uzavíratelných sáčků, aby nedocházelo k odpařování vody. Vzorky past byly odformovány přibližně 4 hodiny od namíchání, aby bylo možné jejich délkové změny začít sledovat co nejdříve. V případě betonů se odformovaly až druhý den.

3.2.3 Typy ošetřování

Pasty:

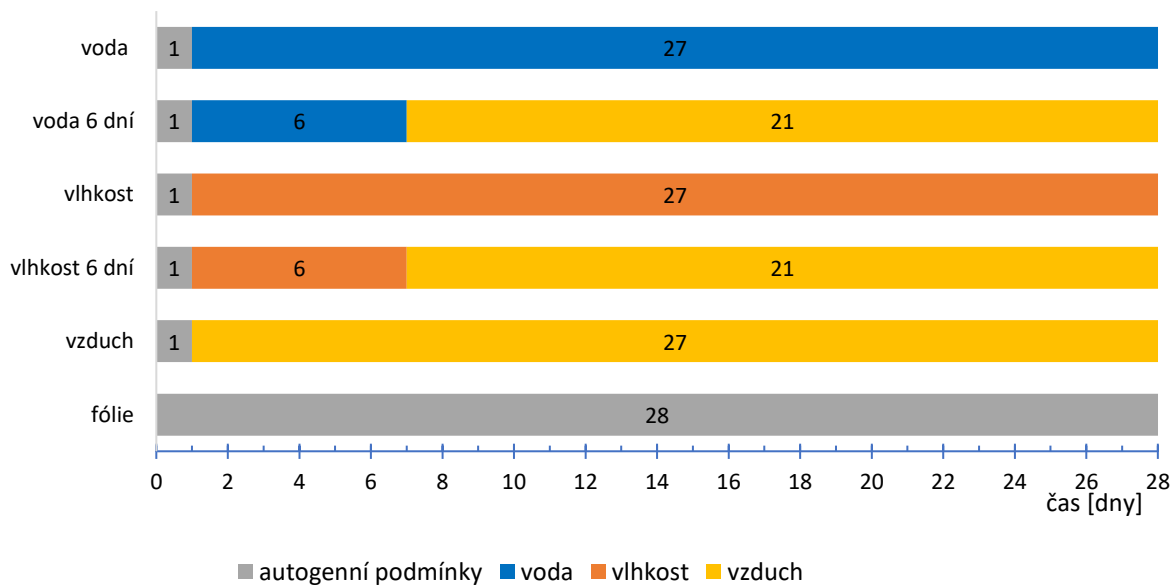
Po odformování se pasty uchovávaly v autogenních podmínkách do stáří 24 hodin. Po uplynutí této doby se vzorky přemístily do různých uložení (viz Obr. 7). První trámeček byl vložen do vody, druhý byl vyndán na vzduch a třetí zůstal v autogenních podmínkách zabalený ve fólii.



Obr. 7: Schéma změn uložení past

Betony:

Ve stáří 24 hodin byly trámečky přemístěny do různých uložení (viz Obr. 8). Dva trámečky byly vloženy do vody, jeden z nich byl vytažen na vzduch po šesti dnech ve stáří trámečku sedm dní. Další dva byly umístěny do vlhkostní komory, jeden z nich byl stejně jako u trámečků ve vodě po šesti dnech vytažen na vzduch. Jeden trámeček byl umístěn na vzduch a poslední byl zabalený do fólie.



Obr. 8: Schéma změn uložení betonů

3.3 Měření délkových změn

Délkové změny byly měřeny přístrojem pro měření délkových změn (tzv. dilatometr). Na obou koncích měřeného trámečku byly umístěny kovové kontakty, díky kterým se vzorek umístil do dilatometru. Přístroj měří relativní výchylku od nulové pozice, proto je nutné vzorky porovnat s etalonem o stálých rozměrech. Výsledná změna délky v procentech byla vypočtena dle rovnice:

$$\Delta l = \frac{(l - l_{et}) - (l_1 - l_{et,1})}{250} \cdot 100, \quad (3)$$

kde l je naměřená výchylka v mm, l_{et} naměřená výchylka etalonu, l_1 je výchylka naměřená po odformování, $l_{et,1}$ naměřená výchylka etalonu po odformování, 250 je vzdálenost mezi kontakty v mm (při měření betonů byla hodnota 250 nahrazena 160). Zároveň s měřením délkových změn byla vážena i hmotnost.

3.4 Měření pevností

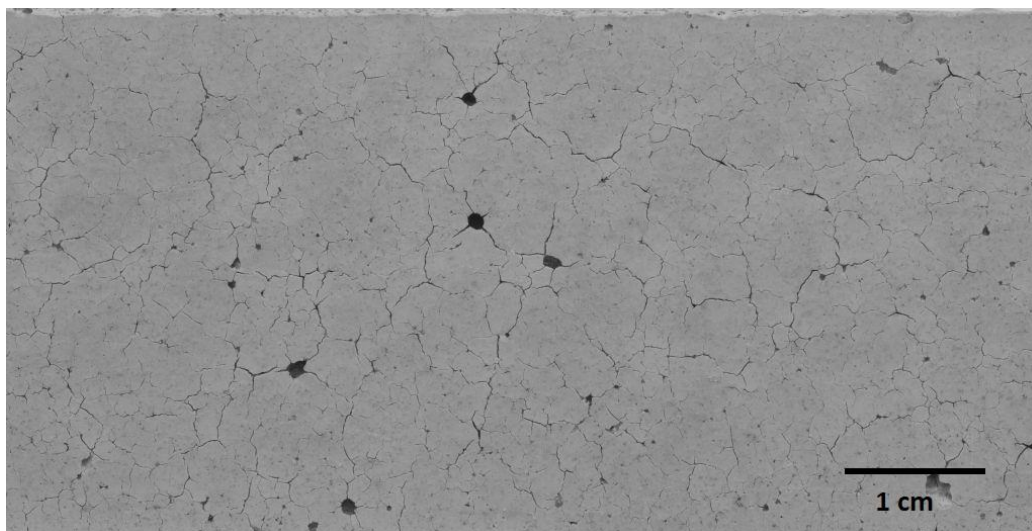
Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku bylo využíváno zkušební pracoviště pro mechanické testování Beton System DESTTEST 3310. Nejprve byla měřena pevnost v tahu za ohybu, poté byly obě poloviny měřeny na pevnost v tlaku.

3.5 Karbonatace

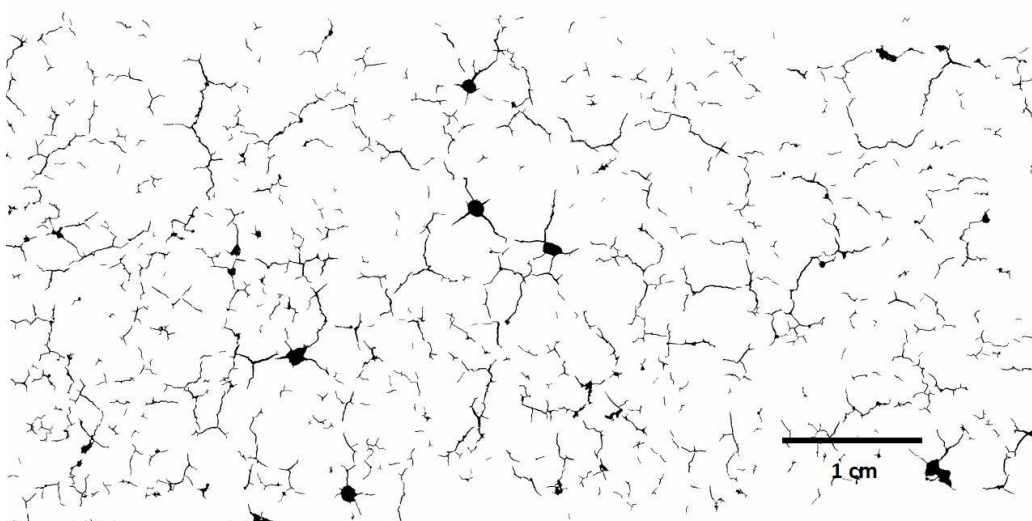
Po změření pevnosti v tahu za ohybu byla focena karbonatace. Polovina trámečku byla nastříkána roztokem fenolftaleinu v etanolu a vyfocena.

3.6 Vyhodnocování trhlin

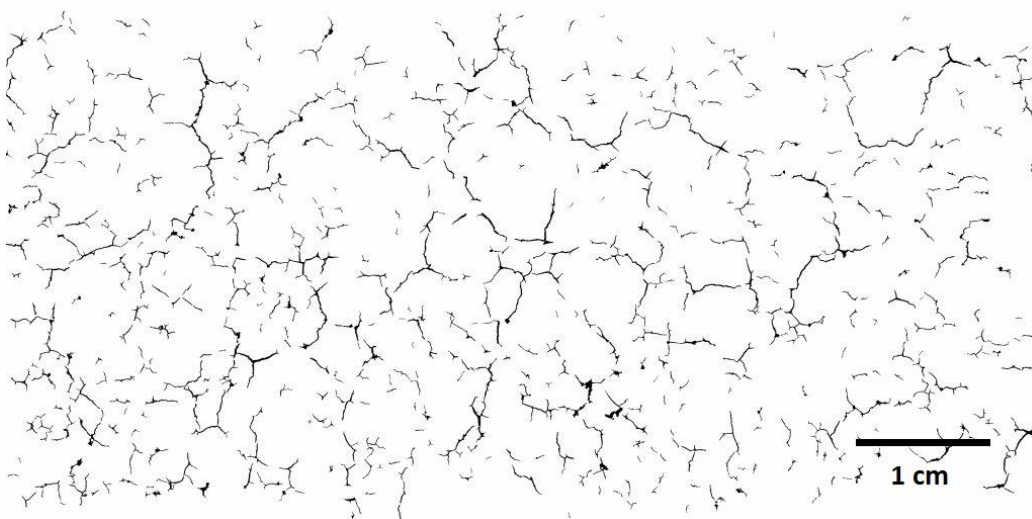
Po uplynutí doby, po kterou bylo měřeno smrštění, se trámečky nafotily běžně dostupným fotoaparátem s makroobjektivem. Fotky byly analyzovány programem ImageJ, který slouží pro obrazovou analýzu. Každý trámeček byl analyzován na 4 místech. Fotky byly nejprve oříznuty a převedeny na stupně šedi (Obr. 9). Poté byl pomocí funkcí Threshold a nastavení parametru kruhovitosti povrch analyzován (Obr. 10). Případné další nežádoucí objekty, zejména póry na povrchu vzorku, byly odfiltrovány ručně (Obr. 11). Výsledkem bylo procentuální množství trhlin (černé barvy) na povrchu trámečku.



Obr. 9: Fotka trámečku oříznutá a převedená na stupně šedi



Obr. 10: Výsledek analýzy před vymazáním pórů



Obr. 11: Výsledek analýzy po vymazání pórů

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

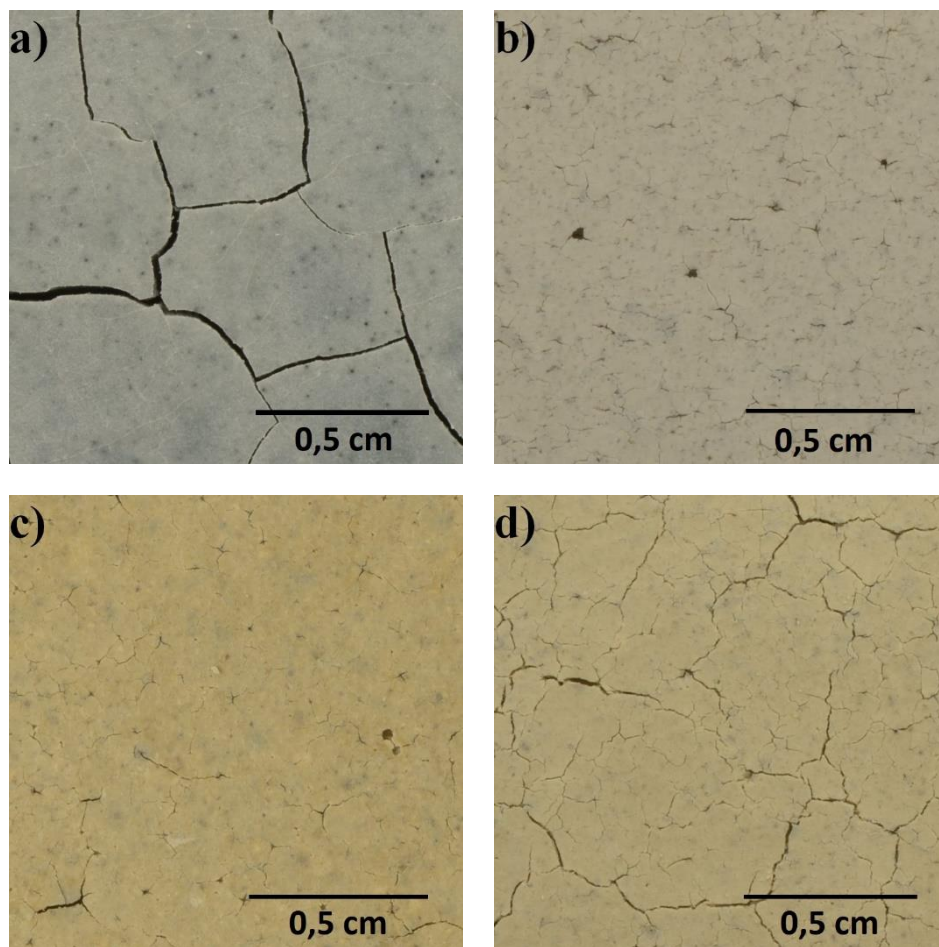
V následujících kapitolách budou uvedeny výsledky měření. První kapitola se věnuje vytipování vhodných těles, kde bude možné pozorovat a vyhodnocovat trhliny (kap. 4.1). Další kapitoly jsou z důvodu velkého množství výsledků rozděleny dle jednotlivých připravovaných směsí, u kterých jsou postupně vyhodnocovány naměřené hodnoty smrštění, pevností v tahu za ohybu a v tlaku, dále trhliny a karbonatace. V kapitole 4.2 byl posuzován vliv dávky odprašků pro dávku vodního skla odpovídající 8 % Na_2O . U vybraných směsí (0 a 40 % odprašků) byly studovány také vzorky se 4 % Na_2O (kap. 4.3). Ve snaze o snížení tendence ke tvorbě trhlin byly připraveny také vzorky se sníženým křemičitým modulem (kap. 4.4). V kapitole 4.5 pak bylo snahou snížit tvorbu trhlin náhradou strusky popílkem a speciálně umletým křemenem.

4.1 Vytipování vhodných těles pro vyhodnocování trhlin

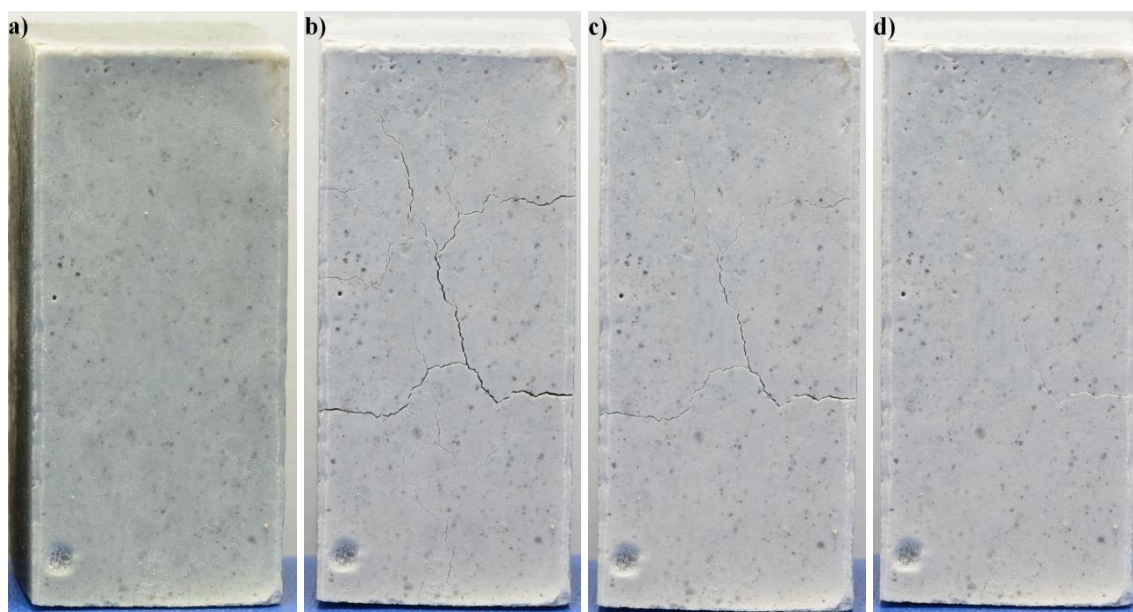
Nejprve bylo nutné vytipovat vhodná tělesa, na kterých bude možné pozorovat vznik trhlin a bude možná jejich obrazová analýza. Pro pozorování vzniku trhlin v pastách byla použita forma na pozorování trhlin, která zabraňuje zavírání trhlin. Pro pozorování trhlin u betonových směsí byly použity rámečky o rozměrech 40×40×160 mm.

Na základě dřívějších zkušeností bylo známo, že tvorba i charakter trhlin na vzorcích alkalicky aktivované strusky souvisí s tím, jak velké kamenivo je pro přípravu vzorků použito. Proto byly připraveny vzorky s 8 % Na_2O bez odprašků s různým kamenivem (Obr. 12). Vzorek pasty bez kameniva měl velké trhliny, které byly dobře viditelné, bylo možné je snadno dokumentovat i analyzovat, ale byly nepravidelně rozloženy. Hlavním problémem pasty je, že není běžně využitelná. Další nevýhodou past je to, že se trhliny mají tendenci uzavírat (Obr. 13). To je pravděpodobně způsobeno tím, že nejprve dojde k vysychání a tím i ke smrštění a souvisejícímu vzniku trhlin na povrchu vzorku, zatímco v jeho vnitřku dojde k vysychání a ke smrštění o něco později, následkem čehož se dříve vzniklé trhliny na povrchu vzorku mají tendenci uzavírat. V takovém případě tedy může být vyhodnocení trhlin ovlivněno tím, kdy je povrch fotografován. Do jisté míry tomu lze předcházet použitím ocelových forem čtvercového tvaru s trnem uprostřed. Fotografie takových vzorků budou uvedeny dále v jednotlivých kapitolách.

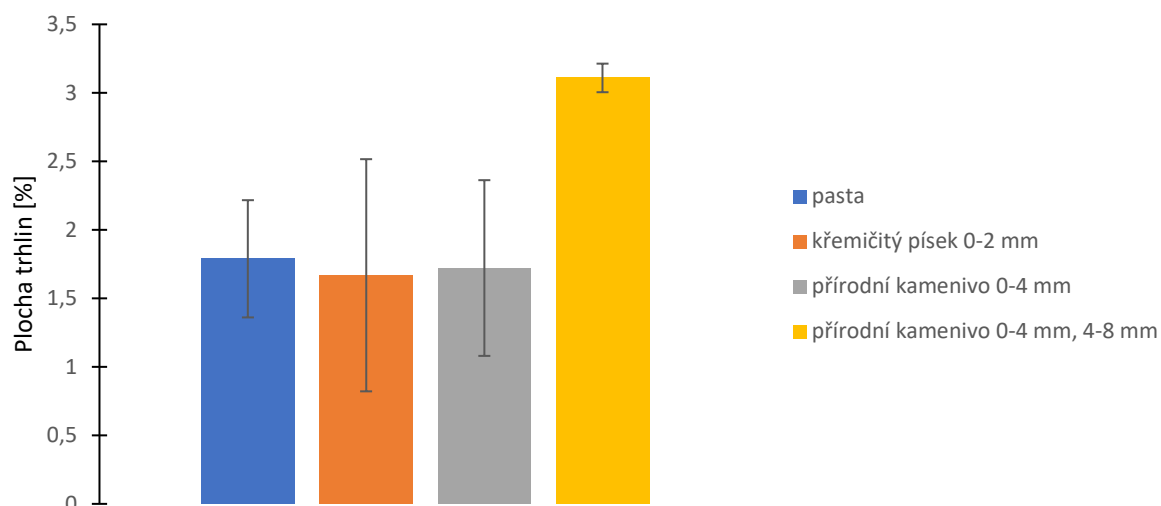
Vzorek s normovaným pískem s velikostí 0–2 mm popraskal velmi malými trhlinami, pouhým okem takřka neviditelnými, které při obrazové analýze splývaly s barevnými odlišnostmi na povrchu trámečku, což analýzu prakticky znemožnilo. Vzorek obsahující přírodní kamenivo s velikostí 0–4 mm, měl trhliny o něco větší, ale jako zdaleka nejlepší se ukázal vzorek s přírodním kamenivem, který obsahoval frakce 0–4 mm a 4–8 mm. Tento vzorek měl navíc trhliny rovnoměrně rozložené po celém povrchu trámečku. Z tohoto důvodu byla u všech betonů použita právě tato kombinace kameniva. Z vyhodnocení vzorků (Obr. 14) s různým kamenivem je patrné, že při použití kameniva s velikostí 0–4 mm a 4–8 mm je plocha trhlin největší, ale směrodatná odchylka je nejmenší. Další výhodou použití betonů je, že se jedná o zamýšlenou formu uplatnění těchto směsí, takže testování probíhá na vzorcích nejpodobnějších praktické aplikaci.



Obr. 12: Vliv různého kameniva na tvorbu trhlin a) pasta; b) normovaný písek 0–2 mm; c) přírodní kamenivo 0–4 mm; d) přírodní kamenivo 0–4 mm a 4–8 mm



Obr. 13: Pasta s 8 % Na_2O bez odprašků v různém stáří a) 24 hodin; b) 38 hodin; c) 52 hodin; d) 65 hodin; vzorek o rozměru 20×20×50 mm



Obr. 14: Vliv typu a velikosti kameniva na plochu trhlin

Dále bylo zjištěno, že pro obrazovou analýzu jsou nevhodné trámečky z ocelových forem. Tyto formy se z důvodu velké přilnavosti materiálu musí důkladně vymazat vazelínou, Vazelína vytváří na povrchu trámečku nerovnosti, problémy způsobovaly například tahy štětcem, které program vyhodnocoval jako trhliny. Dalším problémem jsou povrchové vady přímo na formách. Proto, pokud to bylo možné, byly trámečky pro obrazovou analýzu mícháány do plastových forem, které není nutné vymazávat a které mají povrch hladký.

4.2 Směsi s 8 % Na_2O a různou dávkou bypassových cementářských odprašků

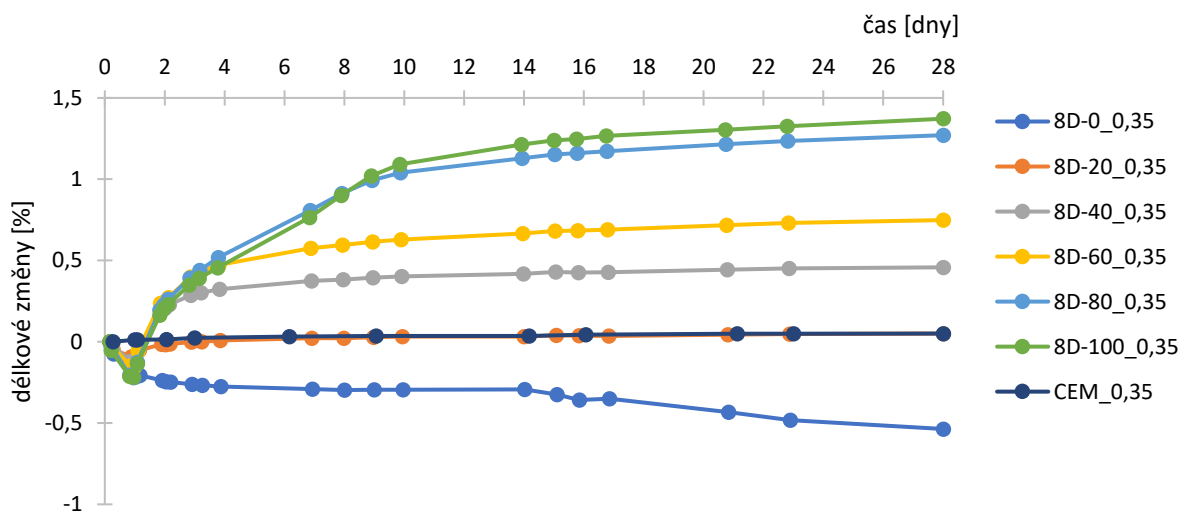
Délkové změny

Délkové a hmotnostní změny byly pozorovány na pastách, které byly připraveny do forem o rozměrech 25×25×285 mm. Změny byly pozorovány ve třech různých uloženích viz kapitola 3.2.3. Z naměřených hodnot byla vynesena závislost relativní délkové změny na stáří pasty.

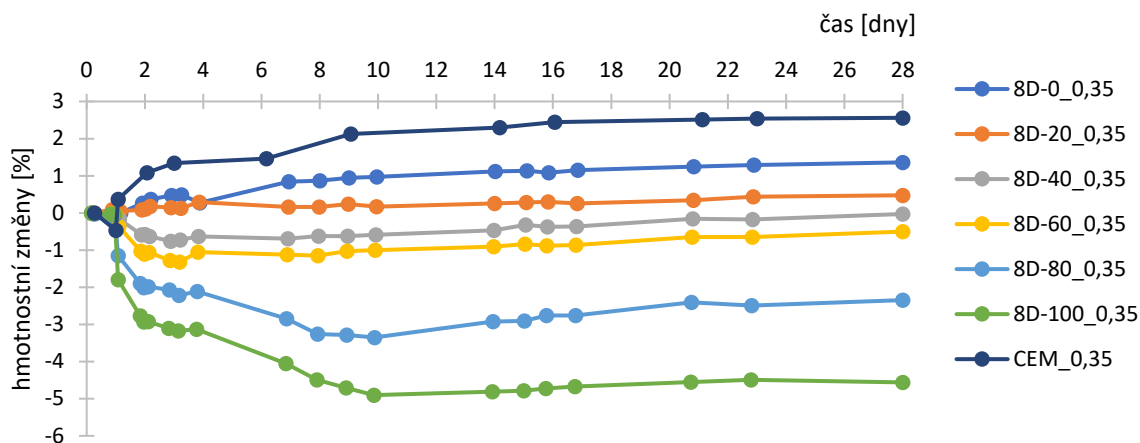
Z obr. 15 je patrné, že při uložení trámečků ve vodě dochází u vzorků s bypassovými cementářskými odpraškami k expanzi. Referenční vzorek vykazuje smrštění, které po 28 dnech odpovídá 0,54 %. Se zvyšující se dávkou odprašků roste expanze, která při náhradě 100 % strusky činí 1,37 %. Při této dávce byl také zaznamenán největší hmotnostní úbytek (Obr. 16). Úbytek hmotnosti se zvyšoval se zvyšující se dávkou odprašků, což bylo způsobeno přítomností rozpustných složek v odprašcích. Vzorek cementové pasty vykazuje nepatrnou expanzi odpovídající expanzi vzorku s 20 % strusky.

Při vysychání na vzduchu (Obr. 17) vykazovala reference v prvních dnech největší smrštění, to se v průběhu vysychání změnilo a po 28 dnech měla reference nejnižší smrštění ze vzorků obsahujících strusku. Přídavek odprašků při vysychání na vzduchu způsoboval větší smrštění. Největší smrštění vykazoval vzorek s 60 % odprašků. Z měřených vzorků měla nejnižší smrštění cementová pasta. Úbytek hmotnosti se se zvyšujícím se množstvím odprašků snižuje (Obr. 18), což může být způsobeno vznikem hydratačních produktů schopných vázat více vody, např. hydroxidu vápenatého.

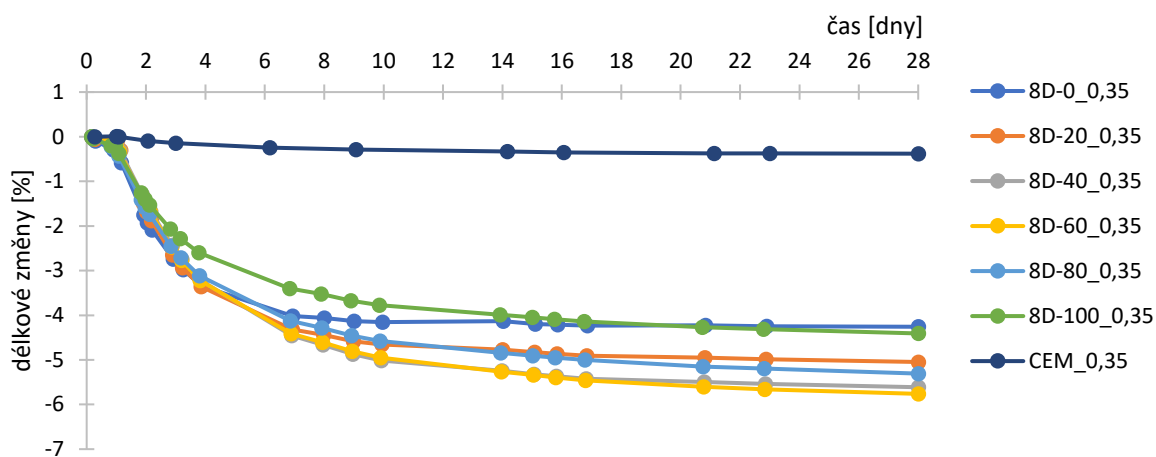
Smrštění v autogenních podmínkách bylo oproti smrštění při vysychání na vzduchu velmi malé. K nejmenšímu smrštění došlo u cementové pasty (Obr. 19). Z alkalicky aktivovaných materiálů vykazovaly nejmenší smrštění vzorky s 0 % a 20 % odprašků. Přídavek odprašků způsobil větší smrštění vzorků.



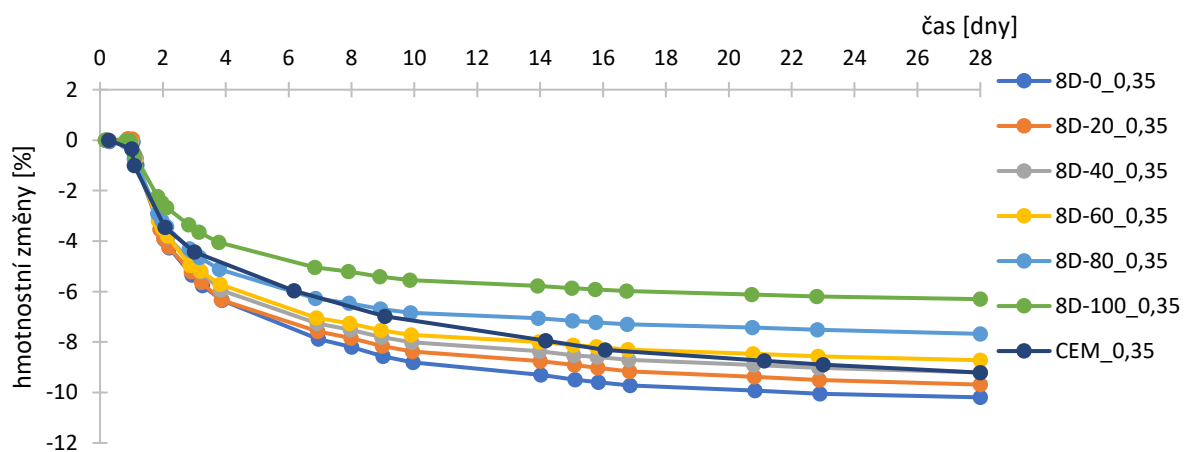
Obr. 15: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové změny při uložení ve vodě



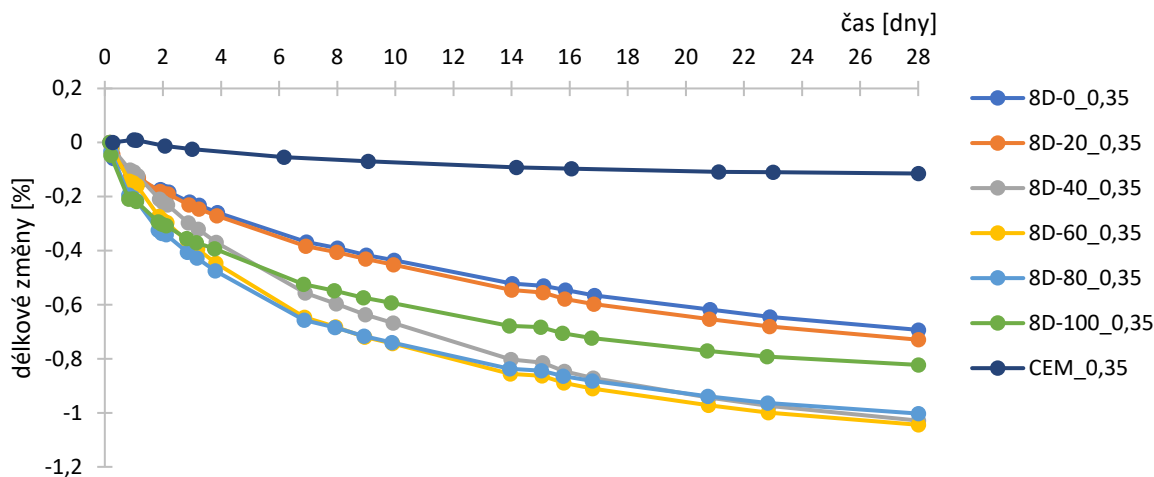
Obr. 16: Vliv bypassových cementářských odprašků na hmotnostní změny při uložení ve vodě



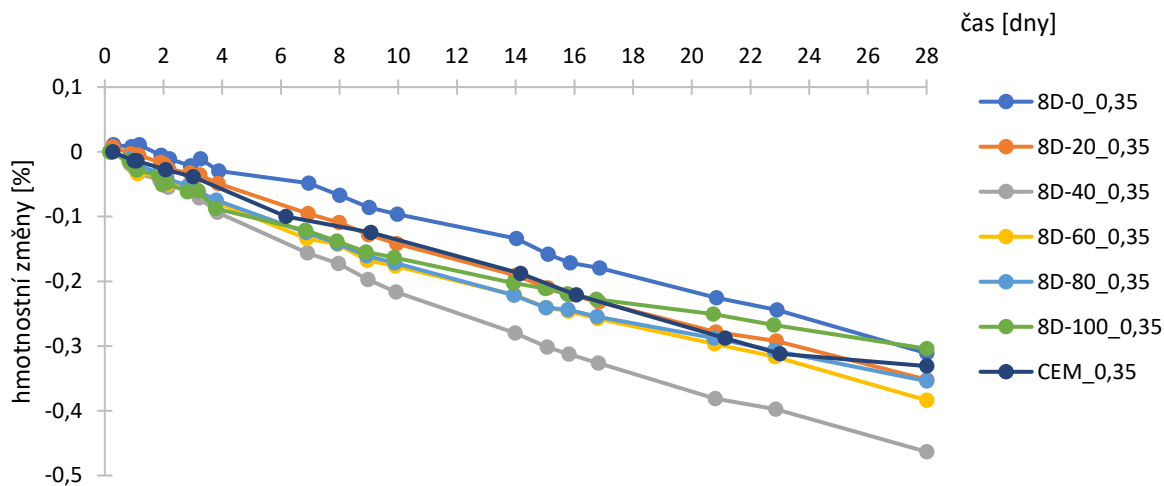
Obr. 17: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové změny při uložení na vzduchu



Obr. 18: Vliv bypassových cementářských odprašků na hmotnostní změny při uložení na vzduchu



Obr. 19: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové změny v autogenních podmínkách



Obr. 20: Vliv bypassových cementářských odprašků na hmotnostní změny v autogenních podmínkách

4.2.1 Bypassové cementářské odprašky nahrazující strusku

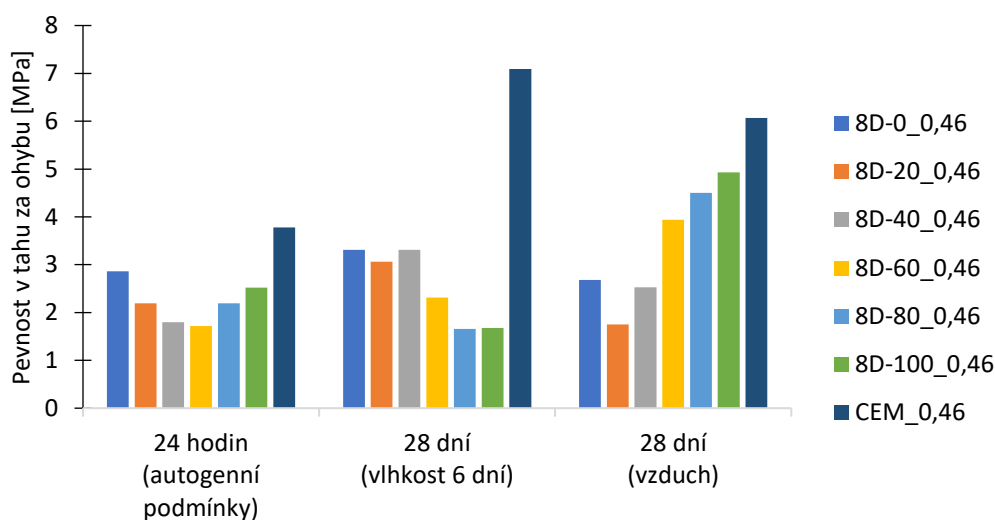
Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

Pevnost v tahu za ohybu byla měřena po odformování ve stáří 24 hodin. Pevnost v tlaku byla také měřena po 24 hodinách, kdy byla změřena polovina trámečku, druhá polovina byla uložena ve vlhkostní komoře a byla změřena ve stáří 7 dní. Po 28 dnech byly trámečky změřeny na pevnost v tahu za ohybu a obě poloviny na pevnost v tlaku. Při diskuzi výsledků je tedy třeba pamatovat na to, že byly získány na malém počtu těles. Nicméně i přes tento fakt vše nasvědčuje tomu, že mají dobrou vypovídající hodnotu.

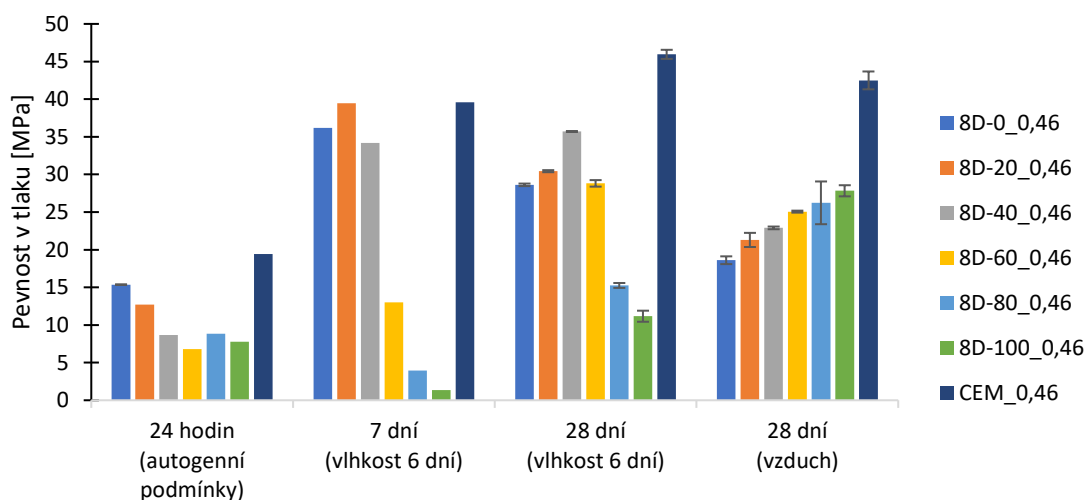
Po 24 hodinách pevnost v tahu za ohybu klesá s přibývajícím množstvím odprašků až do vzorku se 60 % odprašků, kde pevnost začíná zase narůstat (Obr. 21). Při ošetřování ve vlhkostní komoře po dobu 6 dní dochází u vzorků s 80 % a 100 % odprašků ke snížení pevnosti vůči pevnosti naměřené po 24 hodinách. U vzorků ošetřovaných ve vlhkostní komoře dochází s přibývajícím dávkou odprašků ke snižování pevnosti v tahu za ohybu. Při ošetřování na vzduchu

mají vzorky s 20 % a 40 % pevnost nižší než reference. S přibývajícím množstvím odprašků se zvyšuje pevnost v tahu za ohybu na rozdíl od vzorků uchovávaných ve vlhkostní komoře.

Pevnost v tlaku (Obr. 22) po 24 hodinách se s rostoucí dávkou odprašků snižuje, podobně jako u pevnosti v tahu za ohybu. Po 6 dnech ve vlhkostní komoře dochází k výraznému nárůstu pevnosti u vzorků s 0 %, 20 % a 40 % odprašků. Vzorky s 80 % a 100 % odprašků vykazují velký pokles pevností. Pokles pevností u vzorků s velkou dávkou odprašků při ošetřování ve vlhku může být způsoben jejich přílišnou expanzí, jak napovídají výsledky z měření délkových změn. U vzorků z vlhkostní komory, které byly měřeny až po 28 dnech, dochází u směsí s obsahem odprašků 60 % a vyšším k výraznému nárůstu pevnosti v tlaku vůči vzorkům měřeným po 7 dnech. U koncentrací odprašků vyšších než 40 % dochází k poklesu pevností v tlaku i v tahu za ohybu. U vzorků, které byly vyndány na vzduch hned po 24 hodinách, je trend opačný a s rostoucí dávkou odprašků jejich pevnosti v tlaku rostou stejně jako pevnosti v tahu za ohybu.



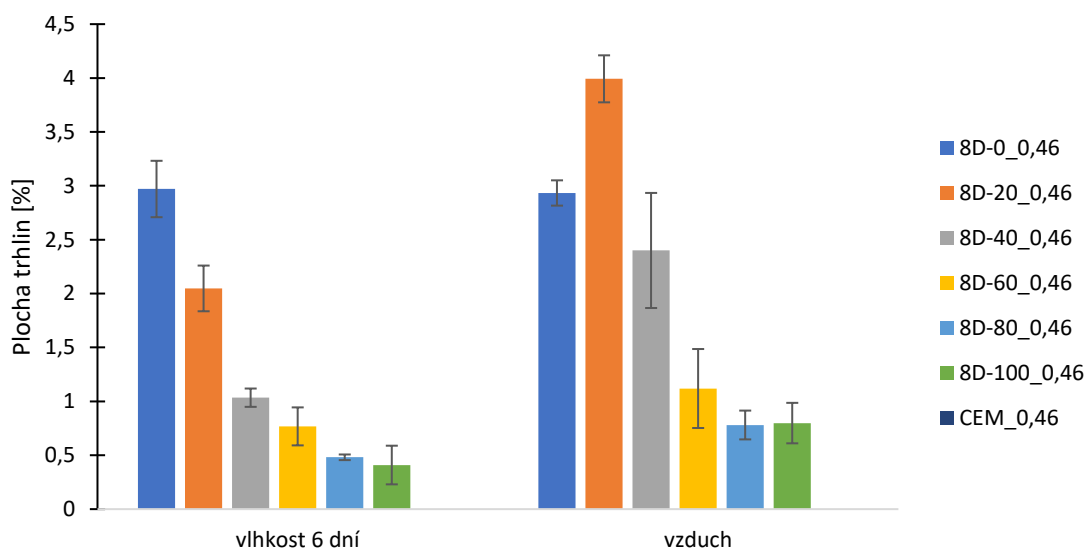
Obr. 21: Vliv bypassových cementářských odprašků na pevnosti v tahu za ohybu



Obr. 22: Vliv bypassových cementářských odprašků na pevnost v tlaku

Trhliny

Množství trhlin se v případě ošetřování ve vlhkostní komoře po dobu 6 dní snižuje s rostoucí dávkou odprašků (Obr. 23). V případě vysychání na vzduchu dochází při 20 % odprašků ke zvýšení množství trhlin proti referenci. Další zvýšení dávky odprašků snižuje množství trhlin. Při ošetřování ve vlhkostní komoře po dobu 6 dní došlo u všech vzorků ke snížení množství trhlin vůči vzorkům, které vysychaly na vzduchu. Za pozornost však stojí to, že ani takto dlouhé ošetřování zde nevede k vymizení tvorby trhlin u žádného ze vzorků.

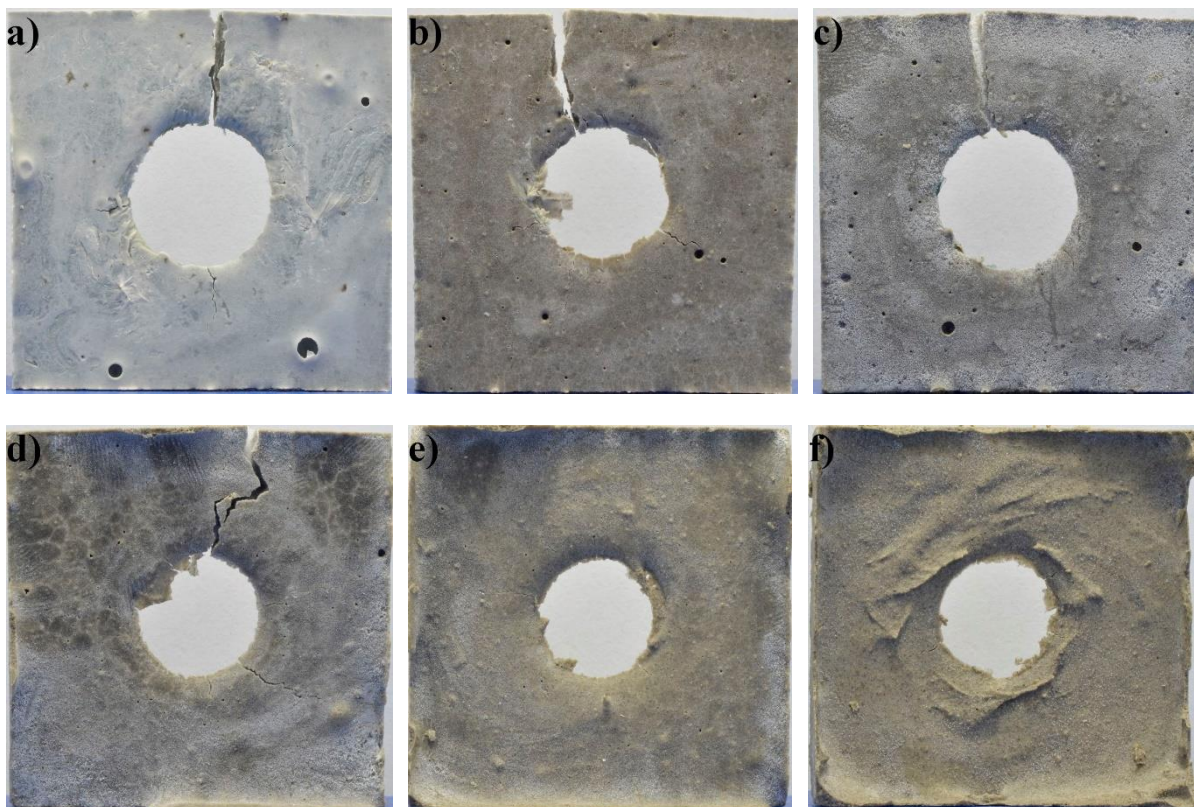


Obr. 23: Vliv bypassových cementářských odprašků na plochu trhlin (cement není v grafu patrný, protože nedošlo k tvorbě trhlin)

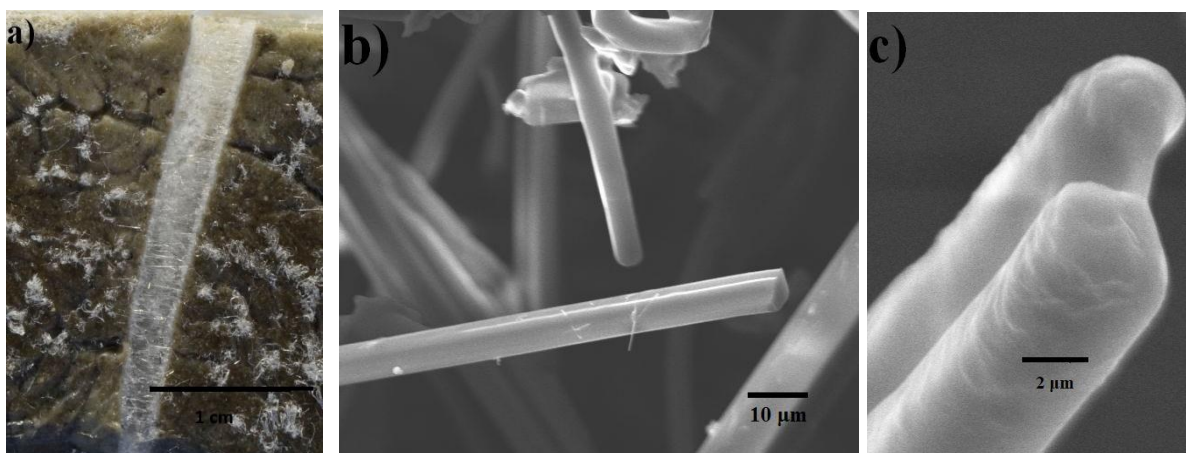
Část od každé připravené pasty byla nalita do formy na praskání. Vzorek cementové passty nepopraskal vůbec (Obr. 24). Na obr. 25 je vidět, že vzorky s 0 %, 20 %, 40 % a 60 % popraskaly. V trhlinách u vzorků s 40 % a 60 % odprašků došlo v trhlíně k růstu krystalů (Obr. 26). Krystaly byly analyzovány na skenovacím elektronovém mikroskopu a rentgenovou krystalografií a bylo určeno, že jsou to krystaly KCl.



Obr. 24: Vzorek cementu z formy na pozorování trhlin



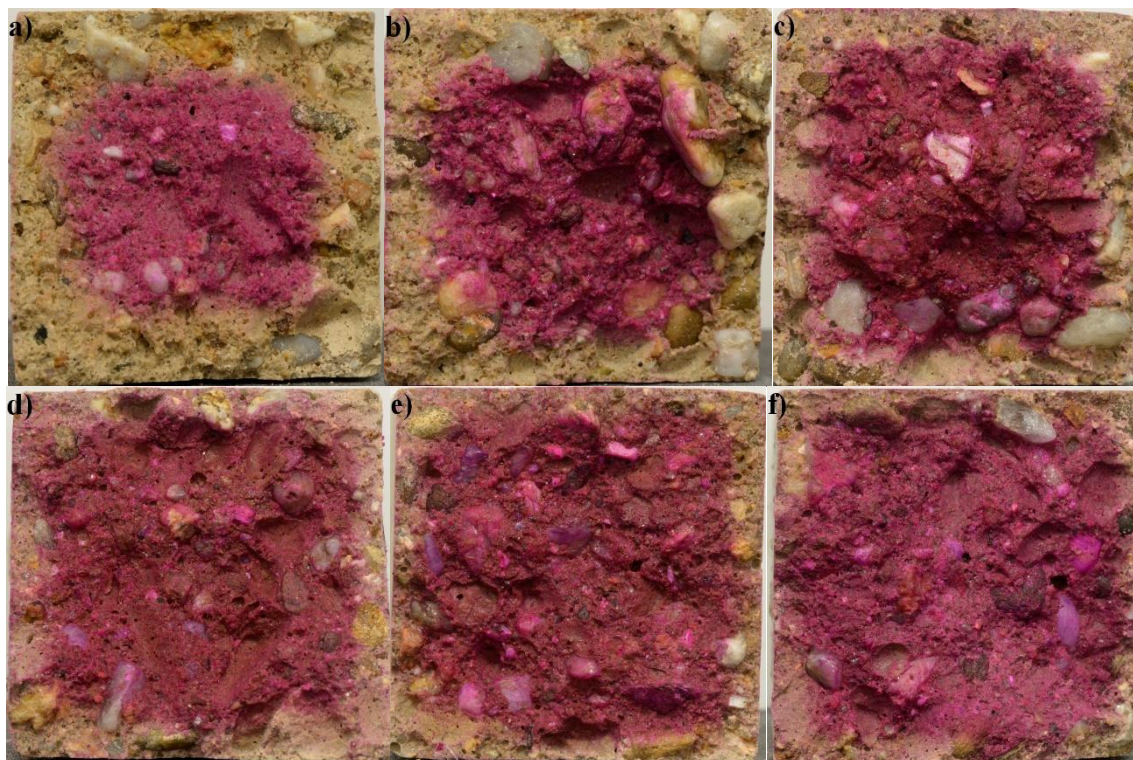
Obr. 25: Vzorky z formy na pozorování trhlin a) 8D-0_0,35; b) 8D-20_0,35; c) 8D-40_0,35; d) 8D-60_0,35; e) 8D-80_0,35; f) 8D-100_0,35



Obr. 26: Krystaly v trhlíně vzorku se 40 % odprašků a) trhlina na vzorku; b) snímek z SEM při zvětšení 2 000×; c) snímek z SEM při zvětšení 10 000×

Karbonatace

Jak je patrné z obr. 27, zvyšující se dávka odprašků snižuje karbonataci. Důvodem může být jednak snížená tvorba trhlin, protože právě trhlinami se může oxid uhličitý snáze dostávat do vzorku, čímž se celý proces zrychluje, ale hlavním důvodem bude spíše fázové složení odprašků, zejména značný obsah volného oxidu vápenatého, který s vodou reaguje na hydroxid vápenatý a během vystavení vzorků vzdušné atmosféře může pojmout značné množství oxidu uhličitého.



Obr. 27: Vliv bypassových cementářských odprašků na karbonataci při uložení na vzduchu
a) 8D-0_0,35; b) 8D-20_0,35; c) 8D-40_0,35; d) 8D-60_0,35; e) 8D-80_0,35; f) 8D-100_0,35

4.2.2 Bypassové cementářské odprašky nahrazující kamenivo

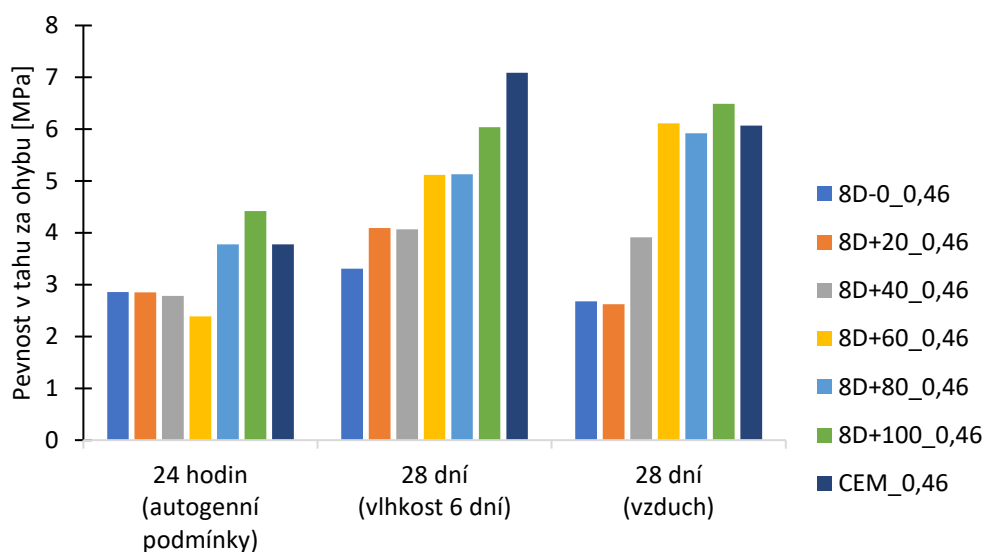
Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

Pevnost v tahu za ohybu byla měřena po odformování ve stáří 24 hodin. Pevnost v tlaku byla také měřena po 24 hodinách, kdy byla změřena polovina trámečku, druhá polovina byla uložena ve vlhkostní komoře a byla změřena ve stáří 7 dní. Po 28 dnech byly trámečky změřeny na pevnost v tahu za ohybu a obě poloviny na pevnost v tlaku.

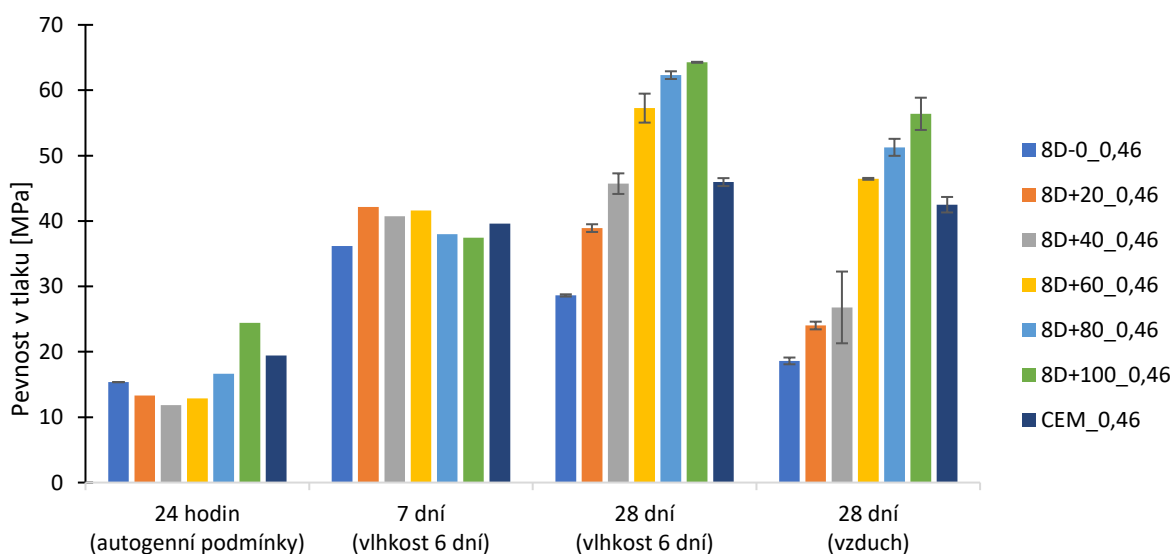
Z naměřených dat (Obr. 28) vyplývá, že pevnost v tahu za ohybu a v tlaku po 24 hodinách s rostoucím množstvím odprašků klesá až do množství odprašků 40–60 %, poté dochází k nárůstu pevností. Stejný trend byl pozorován i v případě nahrazování strusky (Obr. 21, Obr. 22.). Pevnosti jsou však v případě náhrady za kamenivo vyšší, protože nebyla ubírána struska a mohlo dojít k tvorbě většího množství CSH. Během následného šestidenního ošetřování ve vlhkostní komoře (celkové stáří 7 dní) hodnoty pevnosti v tlaku narostly a u různých složení se příliš neliší. Výrazné rozdíly jsou ale patrné po vytažení vzorků z vlhkostní komory na vzduch (testováno po 28 dnech). Zatímco u vzorků s 0 % a 20 % odprašků došlo k poklesu pevnosti v tlaku proti hodnotám naměřeným po 7 dnech, u vzorků s dávkou odprašků 40 % a vyšší pevnosti narostly, a to tím více, čím více kameniva bylo nahrazeno odprašky. Tlakové hodnoty pevností vzorků s vysokými dávkami odprašků dokonce převyšovaly hodnoty pevností vzorků s portlandským cementem. Zajímavé je také vzájemné porovnání vlivu použití odprašků jako náhrady za kamenivo (Obr. 29) a za strusku (Obr. 22), odkud je patrné, že zejména mají-li být použity odprašky ve větším množství, je lepší jimi nahrazovat kamenivo.

Vzorky, které byly po 24 hodinách v autogenních podmínkách vyndány na vzduch, vykazují také nárůst pevností s rostoucí dávkou odprašků jako vzorky s nahrazenou struskou. Rozdíl je v dosažených pevnostech, při náhradě strusky má největší pevnost vzorek se 100 % odprašků, jeho hodnota dosahuje 27 MPa. Stejný vzorek měl při náhradě kameniva pevnost 56 MPa, což je víc než dvojnásobná hodnota. Pevnosti v tahu za ohybu jsou při náhradě za kamenivo (Obr. 28) také vyšší, ale rozdíly nejsou tak veliké. Opět se tedy ukázalo, že je lépe používat odprašky jako náhradu kameniva než jako náhradu strusky.

Hodnoty pevnosti v tlaku pro vzorky, které vysychaly na vzduchu, jsou nižší než hodnoty naměřené u vzorků, které byly 6 dní ve vlhkostní komoře (Obr. 29). Z toho je patrné, že pro vývoj pevnosti je důležitý způsob ošetřování.



Obr. 28: Vliv bypassových cementářských odprašků na pevnost v tahu za ohybu

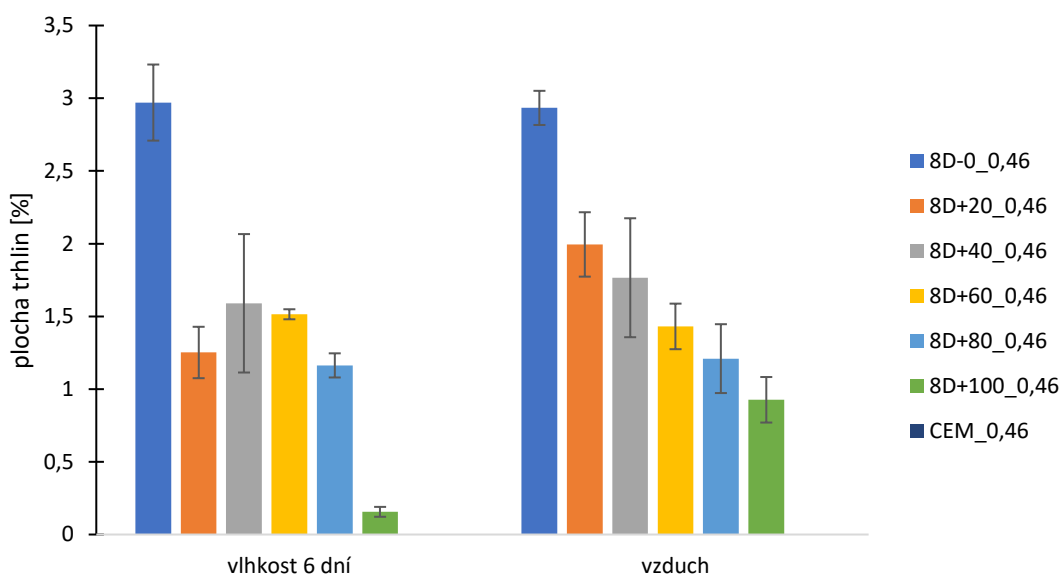


Obr. 29: Vliv bypassových cementářských odprašků na pevnosti v tlaku

Trhliny

Z obr. 30 vyplývá, že zvyšující se dávka odprašků snižuje plochu trhlin při ošetřování ve vlhkostní komoře po dobu 6 dní i při vysychání na vzduchu. Tyto trendy poměrně dobře korelují i s vývojem ohybových i tlakových pevností, tedy že s klesajícím množstvím trhlin pevnosti narůstají.

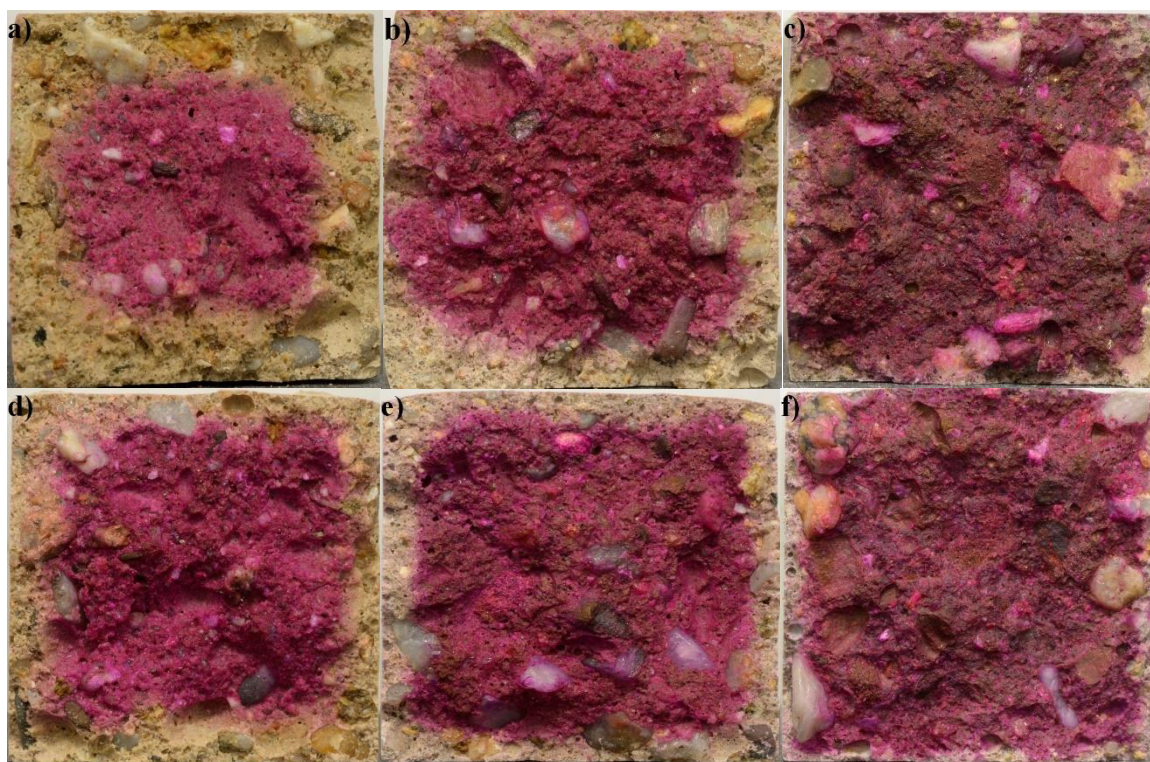
Při porovnání množství trhlin mezi vzorky, kde se nahrazuje kamenivo (Obr. 30), a vzorky, kde se nahrazuje struska (Obr. 23), je patrné, že při množství odprašků vyšším než 60 % je plocha trhlin větší u vzorků, kde bylo nahrazeno kamenivo. Při 20 % a 40 % je plocha trhlin větší při náhradě strusky za odprašky.



Obr. 30: Vliv bypassových cementářských odprašků na plochu trhlin

Karbonatace

Zvyšující se dávka odprašků vedla ke snížení karbonatace stejně jako při náhradě strusky za kamenivo, proto je zde uvedeno srovnání vzorků s 0 %, 40 % a 100 % při ošetřování ve vlhkostní komoře po dobu 6 dní a na vzduchu (Obr. 31). Při uložení ve vlhkostní komoře došlo k mírnému snížení karbonatace oproti vzorkům uloženým na vzduchu.



Obr. 31: Vliv uložení na karbonataci a) 8D-0_0,46 vzduch; b) 8D-40_0,46 vzduch; c) 8D-100_0,46 vzduch; d) 8D-0_0,46 vlhkost 6 dní; e) 8D-40_0,46 vlhkost 6 dní; f) 8D-100_0,46 vlhkost 6 dní

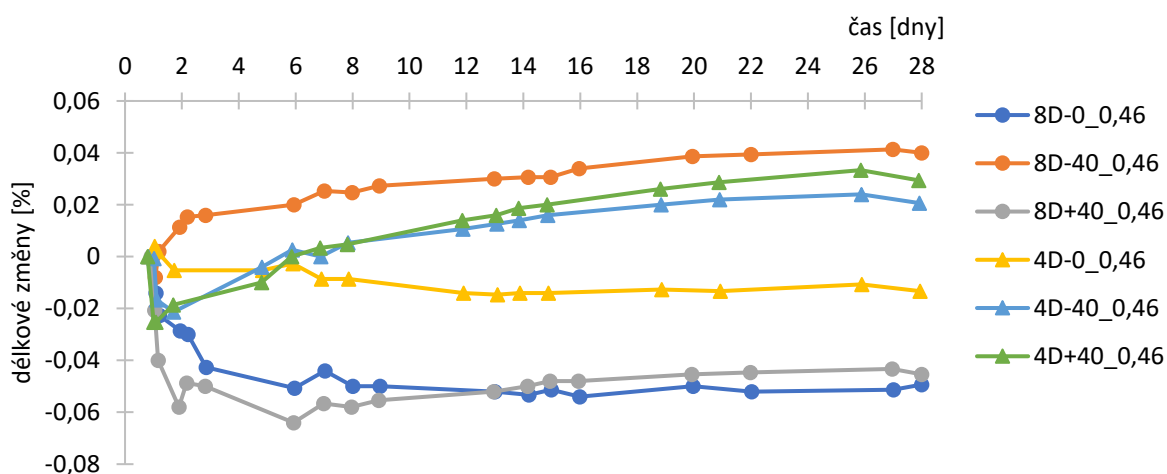
4.3 Směsi s 4 % a 8 % Na_2O a 40 % bypassových cementářských odprašků

Délkové změny betonů

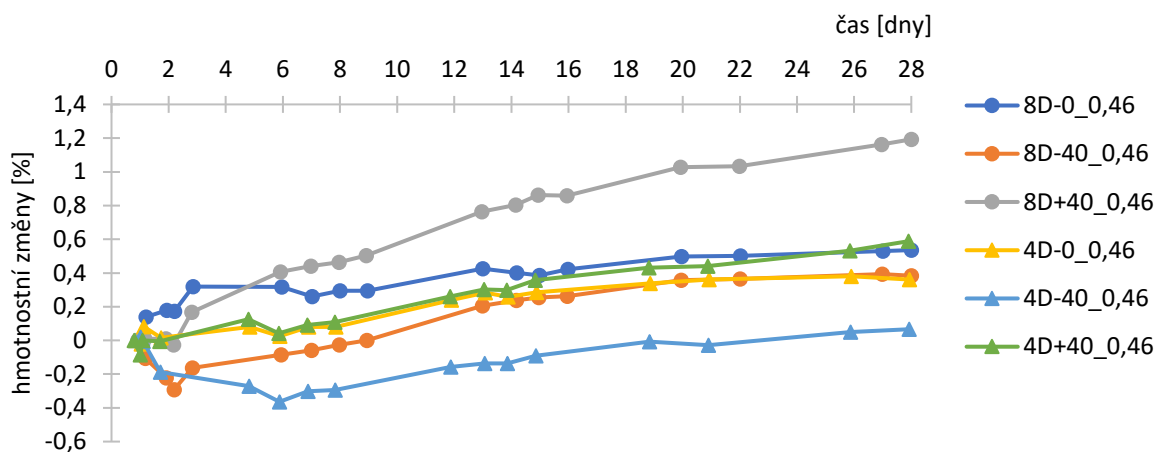
Délkové změny byly měřeny u betonů, které byly připraveny do forem $40 \times 40 \times 160$ mm, při šesti typech ošetřování (viz kapitola 3.2.3).

Při ošetřování ve vodě (Obr. 32, Obr. 34) vykazovaly vzorky s odprašky expanzi. Výjimkou byl vzorek s 8 % aktivátoru a dávkování odprašků za kamenivo ve vodě po celou dobu. Pravděpodobně jde o chybně naměřený trámeček, protože stejný vzorek při uložení ve vodě po dobu 6 dní expanzi podle očekávání vykazoval. Po vytažení na vzduch došlo u trámečků ke smrštění, které bylo asi $10 \times$ nižší, než když byly trámečky vyndány na vzduch hned po 24 hodinách (Obr. 40). Největší smrštění bylo naměřeno u vzorků bez odprašků. Při uložení ve vlhkostní komoře (Obr. 36, Obr. 38) se referenční vzorky smršťovaly, u vzorků s odprašky docházelo k expanzi. Po vytažení z vlhkostní komory dochází ke smrštění stejně jako v případě vzorků uložených 6 dní ve vodě. Vzorky se 4 % aktivátoru při uložení ve vlhkostní komoře svou délkou po 28 dnech změnily pouze o 0,04 % a 0,008 % proti původnímu rozměru. Při uložení na vzduchu (Obr. 40) vykazovaly nejmenší smrštění referenční vzorky, které měly největší hmotnostní úbytky. Při ošetřování v autogenních podmínkách (Obr. 42) došlo k největšímu smrštění u referenčních vzorků. Rozdíly mezi vzorky se struskou byly minimální.

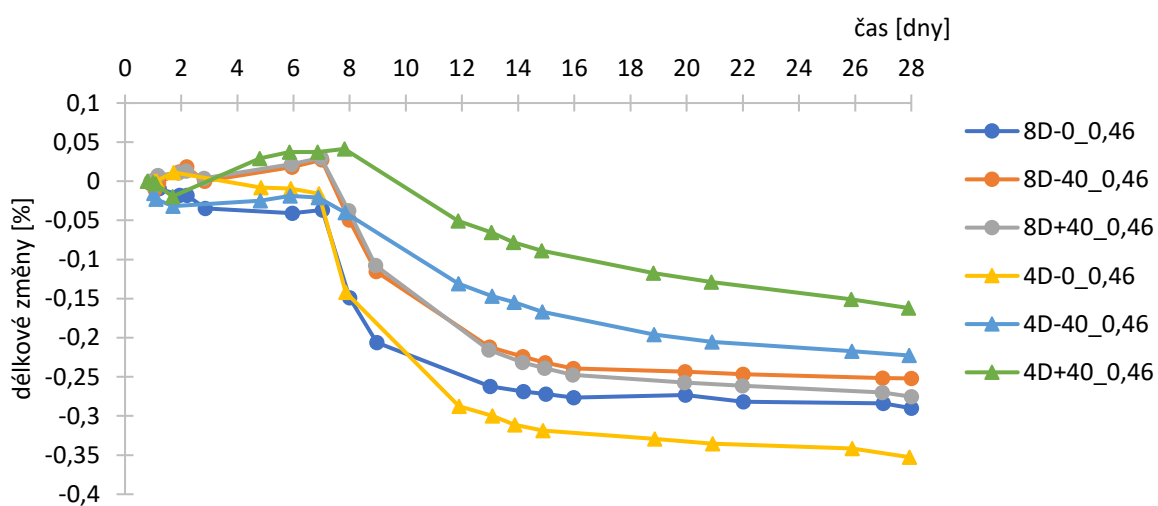
Z naměřených dat není zřejmý jasný vliv náhrady za strusku nebo kamenivo na délkové změny. Při uložení ve vodě (Obr. 32, Obr. 34) se vliv na délkové změny liší dle použité dávky aktivátoru. U vzorků s 8 % Na_2O je expanze vyšší při nahrazení strusky. Při použití 4 % Na_2O je naopak expanze vyšší při náhradě kameniva. Ve vlhkostní komoře (Obr. 36, Obr. 38) je při obou dávkách aktivátoru vliv náhrady stejný. Při nahrazení za strusku byla větší expanze a nižší smrštění po vyndání na vzduch. Při uložení na vzduchu opět záleží na dávce aktivátoru (Obr. 40). V autogenních podmínkách bylo smrštění nižší při nahrazení části kameniva za odprašky.



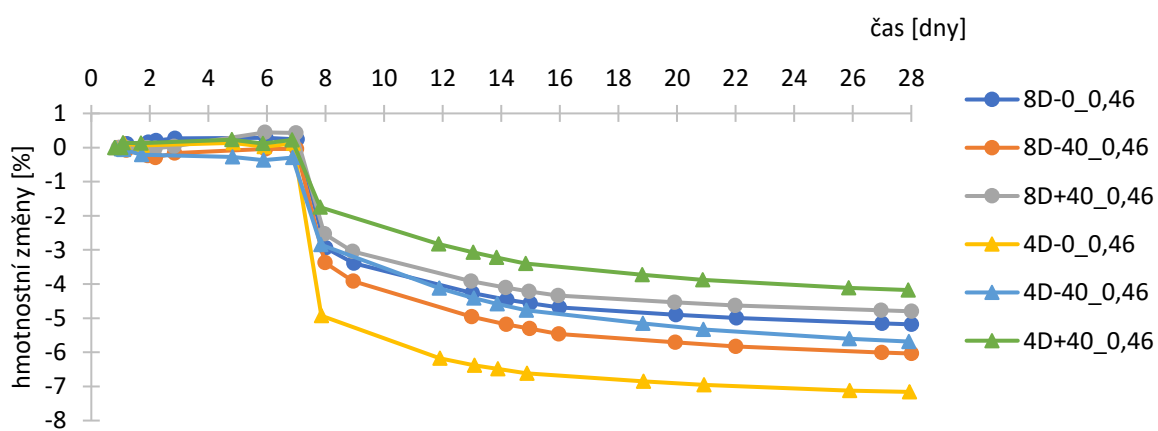
Obr. 32: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové změny při uložení ve vodě



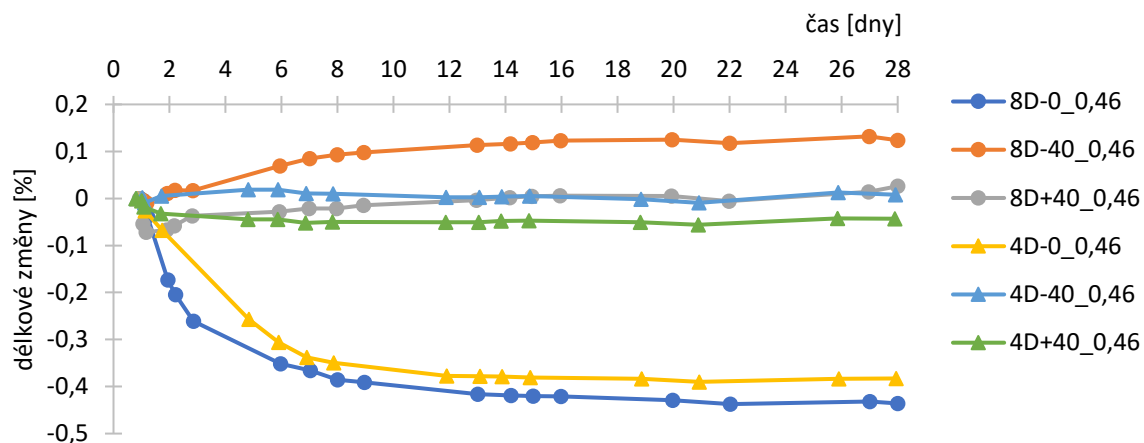
Obr. 33: Vliv bypassových cementářských odprašků na hmotnostní změny při uložení ve vodě



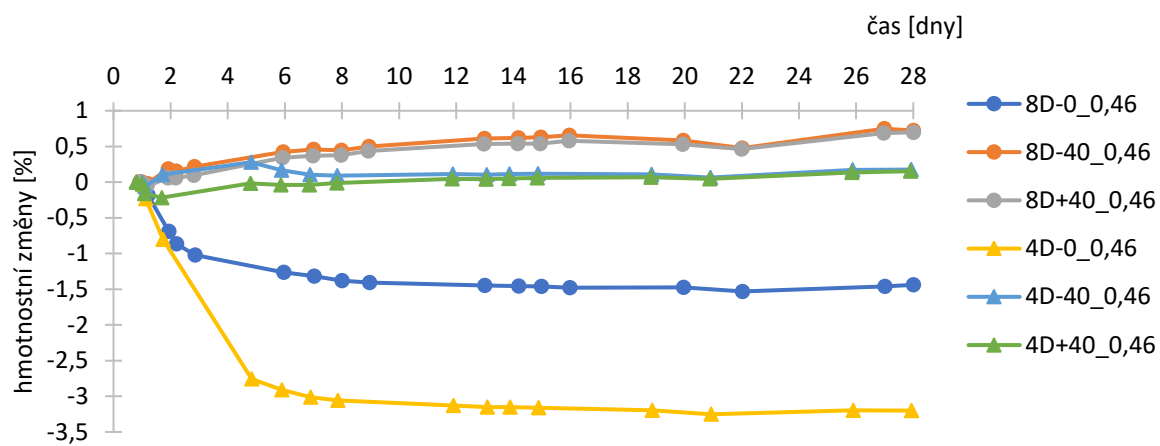
Obr. 34: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové změny při uložení ve vodě po dobu 6 dní



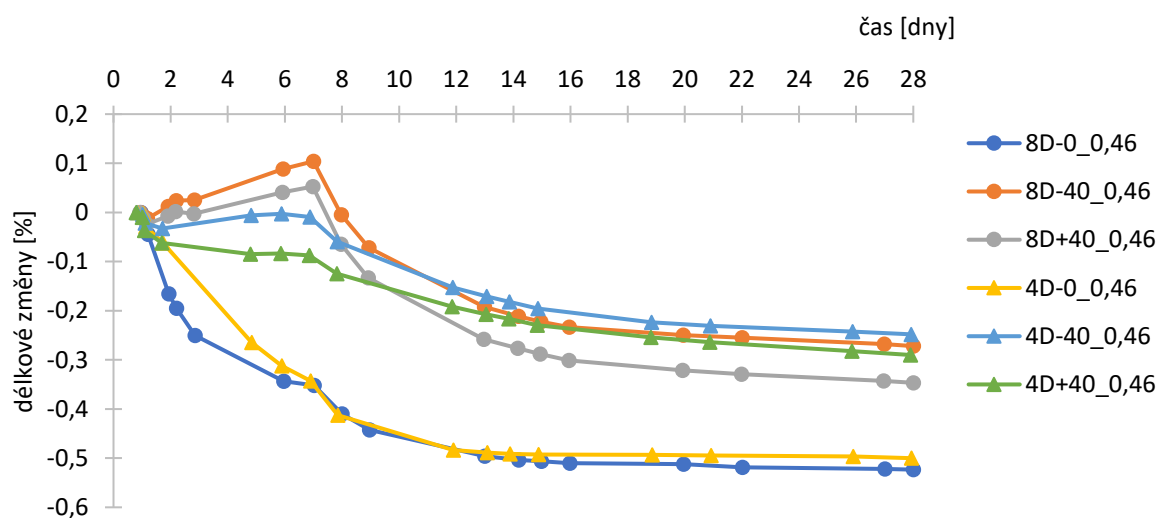
Obr. 35: Vliv bypassových cementářských odprašků na hmotnostní změny při uložení ve vodě po dobu 6 dní



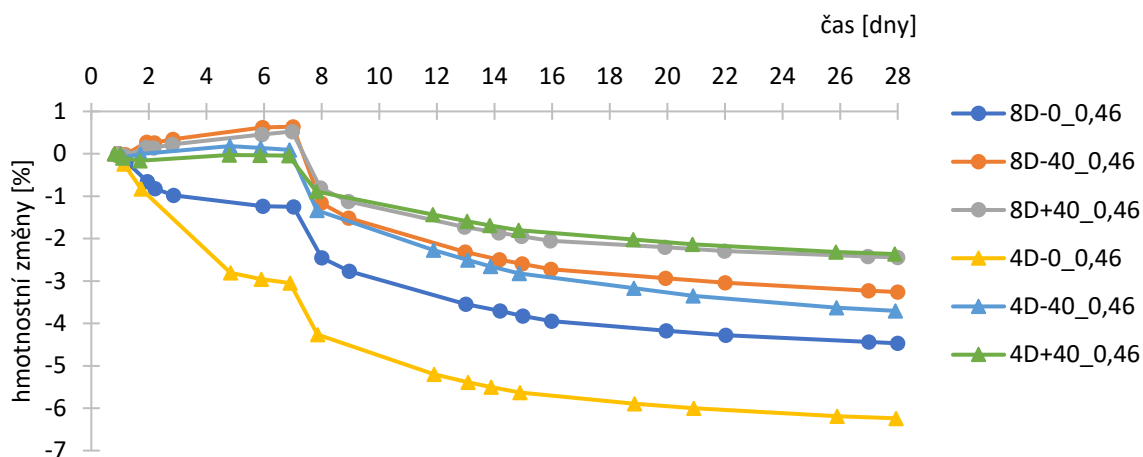
Obr. 36: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové změny při uložení ve vlhkostní komoře



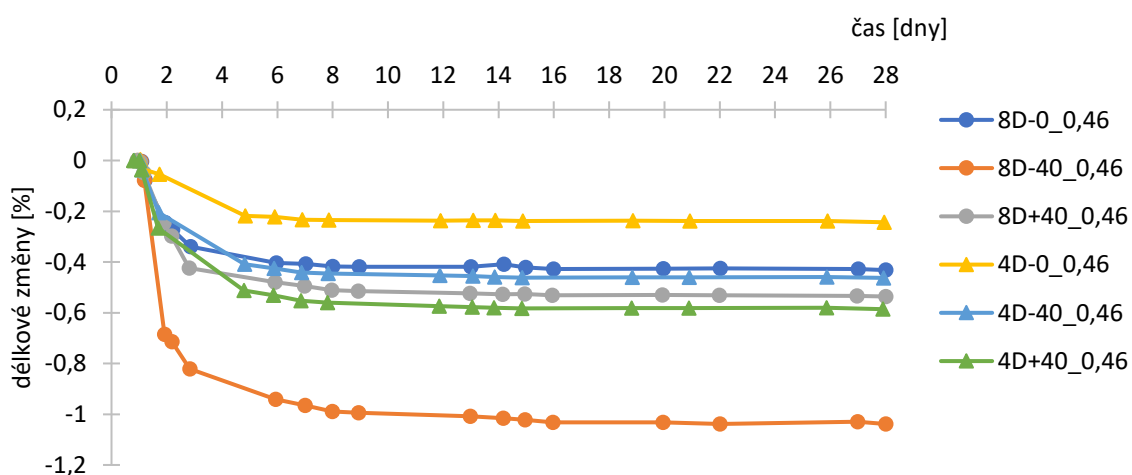
Obr. 37: Vliv bypassových cementářských odprašků na hmotnostní změny při uložení ve vlhkostní komoře



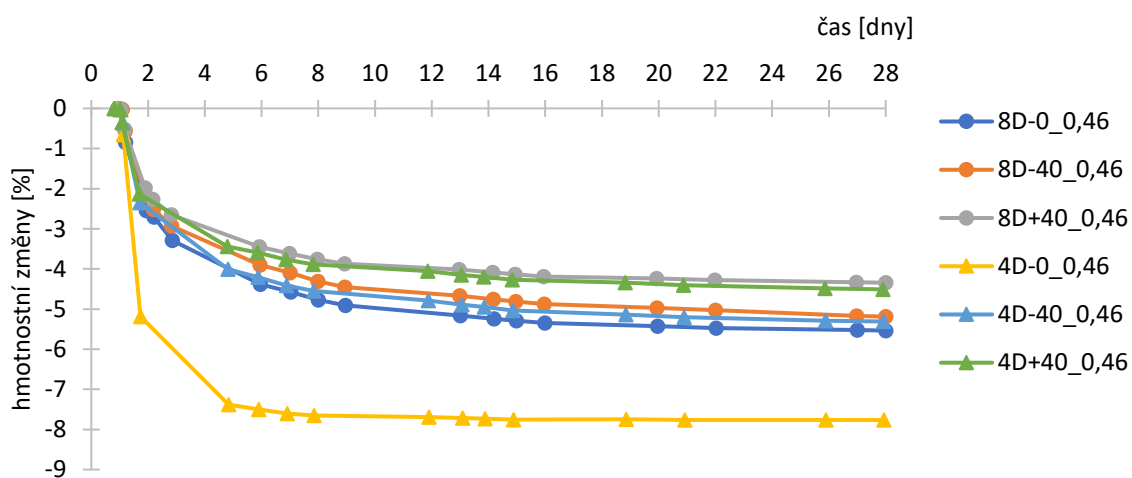
Obr. 38: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové změny při uložení ve vlhkostní komoře po dobu 6 dní



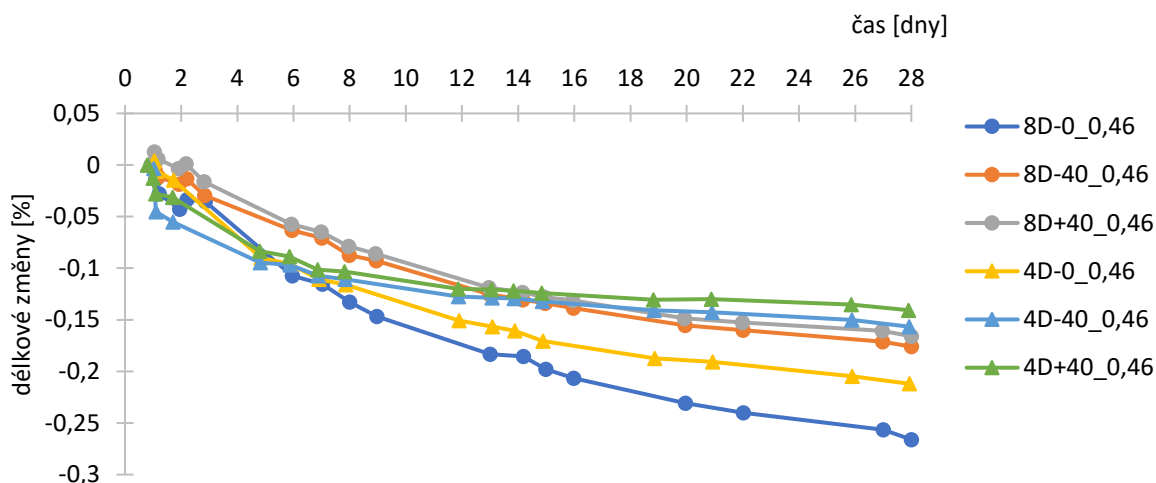
Obr. 39: Vliv bypassových cementářských odprašků na hmotnostní změny při uložení ve vlhkostní komoře po dobu 6 dní



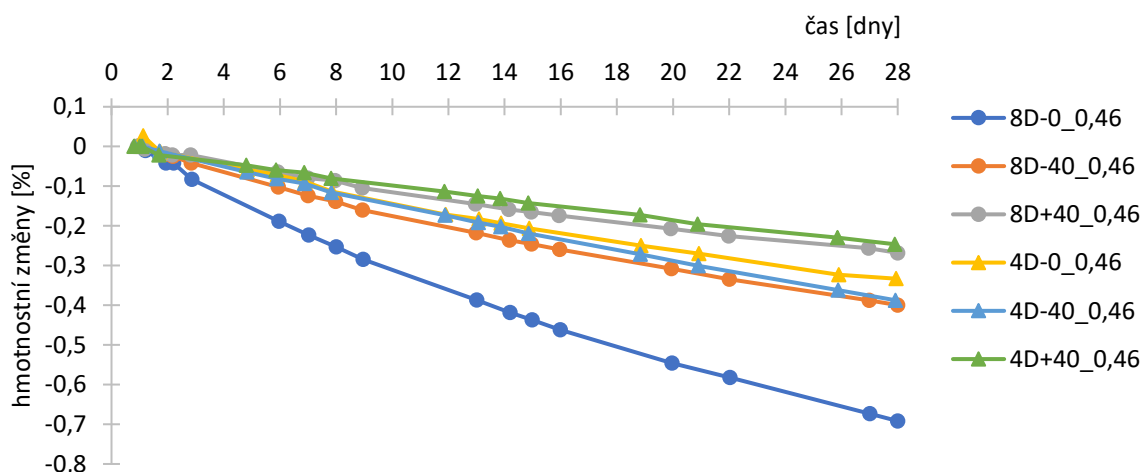
Obr. 40: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové změny při uložení na vzduchu



Obr. 41: Vliv bypassových cementářských odprašků na hmotnostní změny při uložení na vzduchu



Obr. 42: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové změny při uložení v autogenních podmínkách

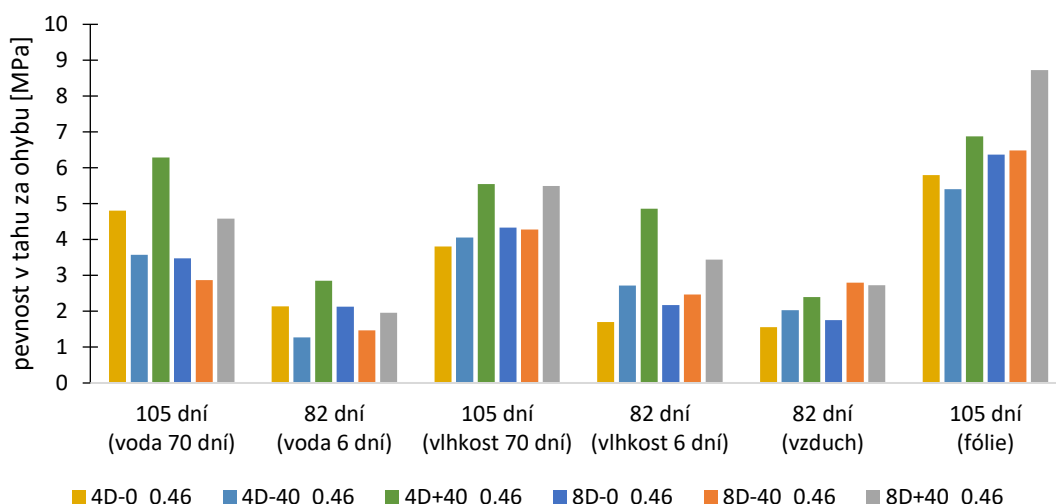


Obr. 43: Vliv bypassových cementářských odprašků na hmotnostní změny při uložení v autogenních podmínkách

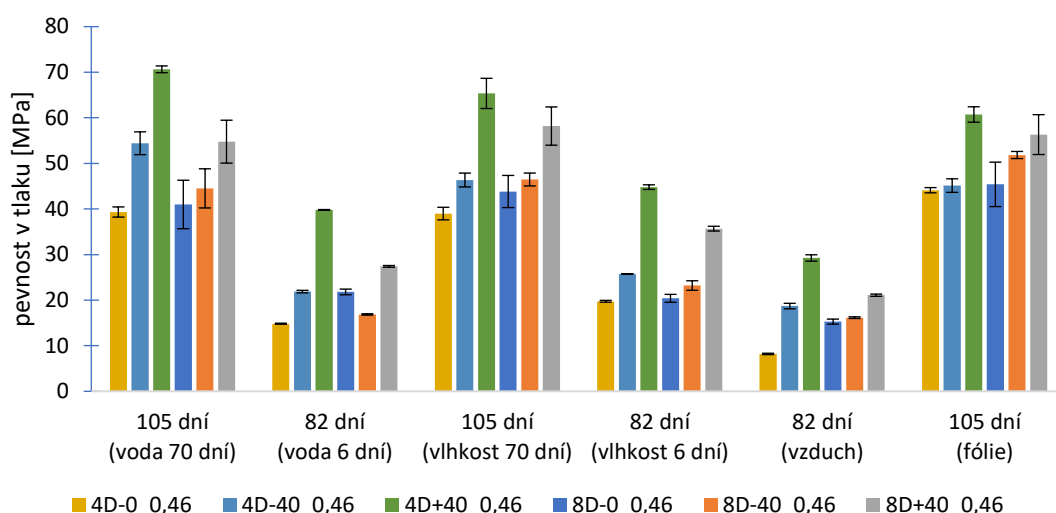
Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku byly u betonů s 8 % a 4 % Na_2O měřeny po 82 dnech od namíchání pro tyto tři režimy ošetřování: 6 dní ve vodě potom na vzduchu, 6 dní ve vlhkostní komoře a trámečky, které byly od začátku na vzduchu. Trámečky, které byly po celou dobu měření smršťování ve vodě nebo vlhkostní komoře, byly po 70 dnech vytaženy na vzduch a jejich pevnosti byly měřeny až ve stáří 105 dní. Trámečky zabalené ve fólii byly také měřeny až po 105 dnech.

Z naměřených hodnot vyplývá, že jak pevnosti v tahu za ohybu (Obr. 44), tak pevnosti v tlaku (Obr. 45) jsou nejvyšší při náhradě odprašků za kamenivo, bez ohledu na použité množství aktivátoru. Nejvyšších pevností bylo dosaženo při dlouhodobém ošetřování vzorků.



Obr. 44: Vliv bypassových cementářských odprašků na pevnost v tahu za ohybu při různém uložení



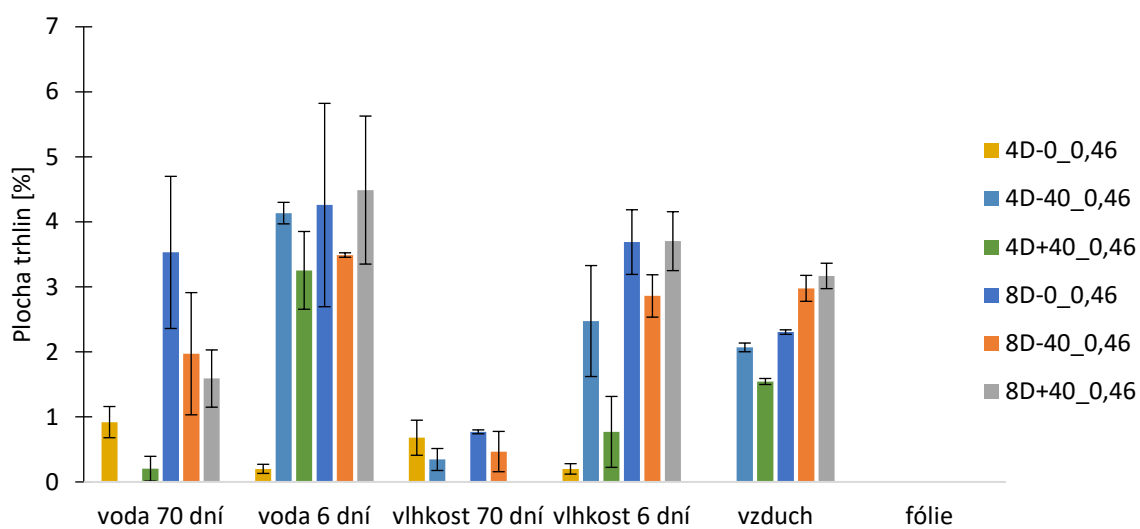
Obr. 45: Vliv bypassových cementářských odprašků na pevnost v tlaku při různém uložení

Trhliny

Vzorky, které byly uloženy ve vodě a vlhkostní komoře po celou dobu měření délkových změn, byly po 70 dnech vyndány na vzduch. Po vyndání na nich nebyly žádné pozorovatelné trhliny. Obrazová analýza těchto vzorků byla provedena až po 35 dnech od vyndání na vzduch. Z důvodu použití ocelových forem na přípravu vzorků mají výsledky horší přesnost.

Z obrazové analýzy vyplývá, že vzorky se 4 % Na_2O mají méně trhlín než vzorky s 8 % (Obr. 46). Největší plocha trhlín byla zjištěna při uložení ve vodě po dobu 6 dní. Při 8 % Na_2O byl zaznamenán pokles množství trhlín při náhradě strusky za odprašky při obou typech uložení ve vodě i ve vlhkosti. V těchto uloženích došlo u vzorků, kde byla nahrazena struska, z hlediska délkových změn k větší expanzi (Obr. 32, Obr. 34, Obr. 36, Obr. 38), která po vytažení na vzduch vedla k nižšímu smrštění. Při uložení na vzduchu, ve vodě po dobu 6 dní a vlhkosti po dobu 6 dní náhrada kameniva za strusku zvýšila množství trhlín. V autogenních podmínkách nebyly trhliny zaznamenány na žádném ze vzorků. Smrštění vzorků v autogenních podmínkách

(0,14–0,26 %) bylo vyšší než smrštění dlouhodobě ošetřovaných vzorků, které po 30 dnech od vytažení vykazovaly smrštění 0,05–0,15 %. Z toho lze usuzovat, že délkové změny nejsou jediným faktorem způsobujícím tvorbu trhlin.



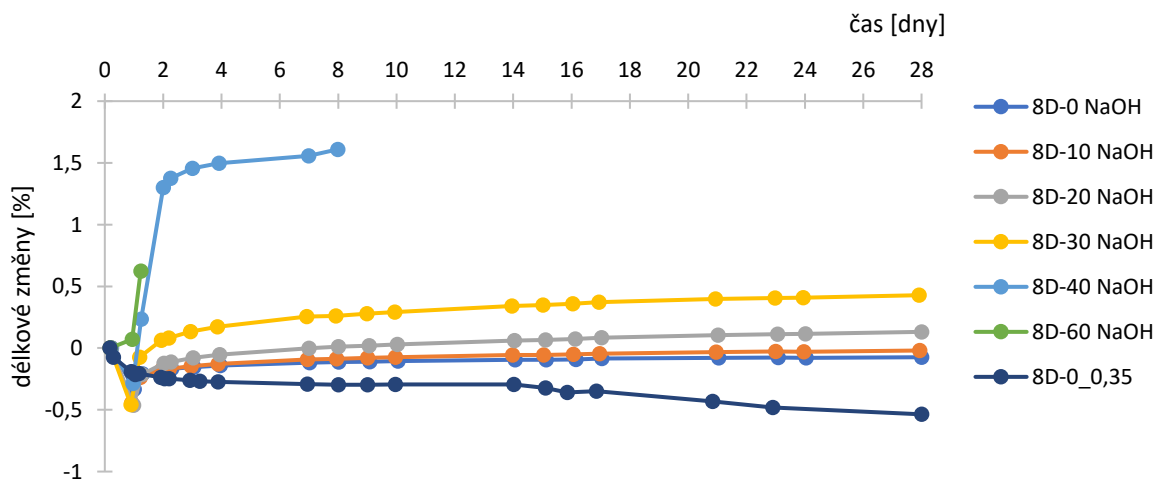
Obr. 46: Vliv bypassových cementářských odprašků na plochu trhlin při různém uložení

4.4 Směsi při použití aktivátoru s křemičitým modulem sníženým na hodnotu 0,5

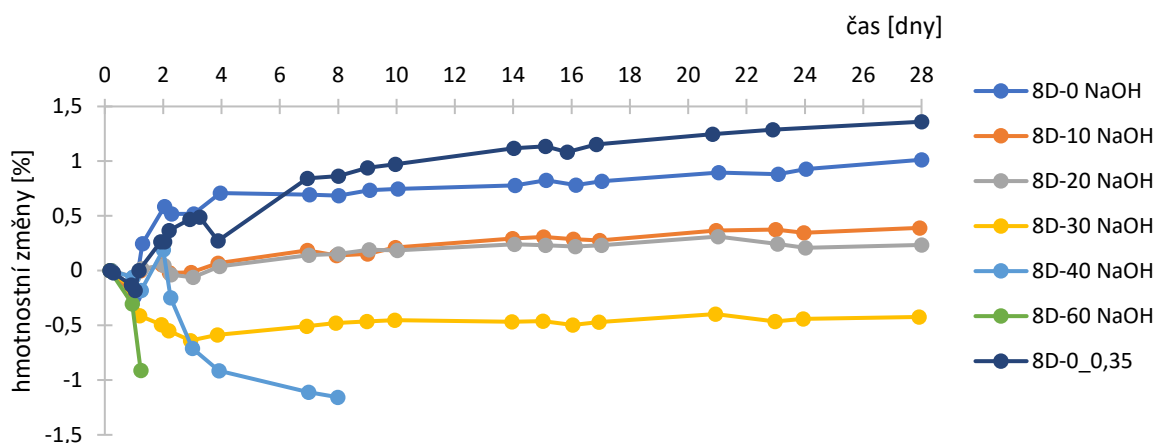
Délkové změny past

Při použití aktivátoru s křemičitým modulem sníženým na hodnotu 0,5 pomocí přídavku 50% roztoku NaOH došlo k výraznému urychlení tuhnutí vzorků. Se zvyšujícím se množstvím odprašků se zpracovatelnost velmi zhoršovala, proto byly místo vzorků s 80 % a 100 % připraveny vzorky s 10 % a 30 % odprašků.

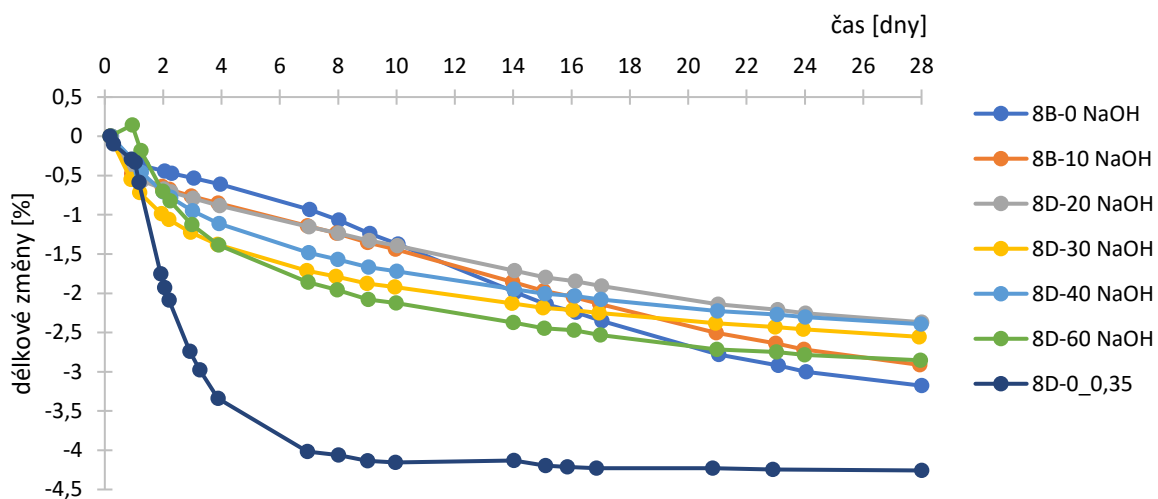
Při nižším křemičitém modulu vzorky uložené ve vodě vykazovaly expanzi. S rostoucím množstvím odprašků byla pozorována zvyšující se expanze (Obr. 47) stejně jako v případě vzorků aktivovaných pouze vodním sklem (Obr. 15). U vzorků s 40 % a 60 % odprašků vedla expanze až k rozpadu trámeček. Při náhradě 60 % strusky za odprašky došlo k rozpadu za méně než 24 hodin po uložení do vody, při 40 % odprašků se trámeček rozpadl po 7 dnech od uložení do vody. Tyto vzorky měly také největší hmotnostní úbytky. Při vysychání na vzduchu (Obr. 49) dochází při porovnání se vzorkem aktivovaným pouze vodním sklem k značnému snížení smrštění. Dochází také ke změně tvaru křivky smrštění, při použití nižšího křemičitého modulu je smršťování pozvolnější. U reference s nižším křemičitým modulem v první třetině času reference vykazuje nižší smrštění než vzorky s odprašky, v poslední třetině už vykazuje nejvyšší smrštění. Z hlediska hmotnostních změn se přidáním odprašků úbytek hmotnosti výrazně zmenšuje bez ohledu na dávku odprašků. Nejnižší hmotnostní úbytek vykazuje vzorek s 30 % odprašků.



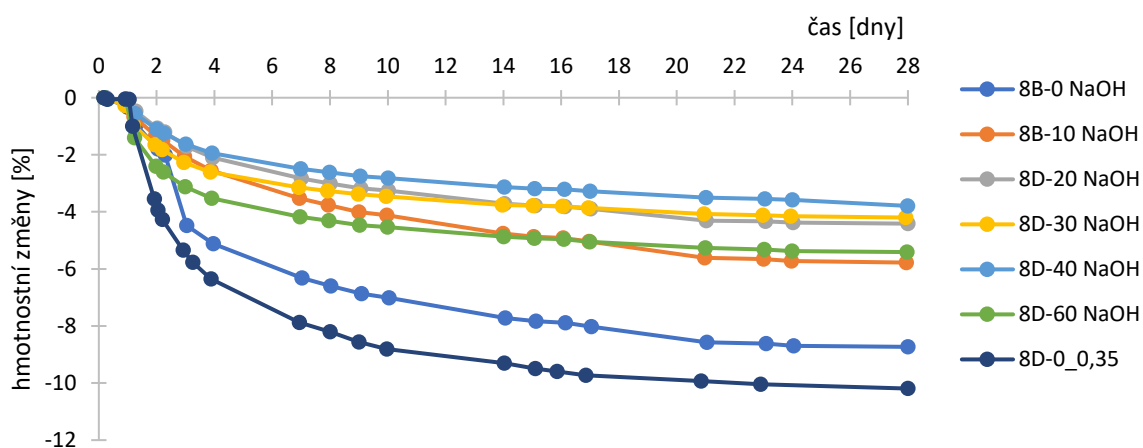
Obr. 47: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové změny při uložení ve vodě



Obr. 48: Vliv bypassových cementářských odprašků na hmotnostní změny při uložení ve vodě



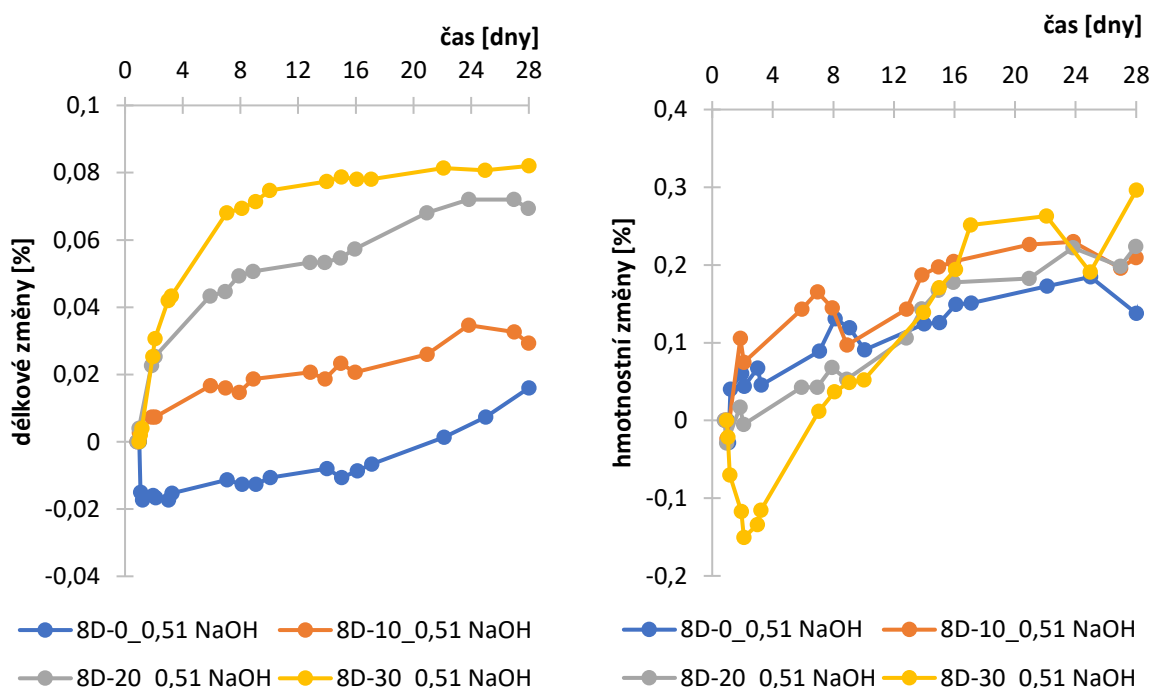
Obr. 49: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové změny při vysychání na vzduchu



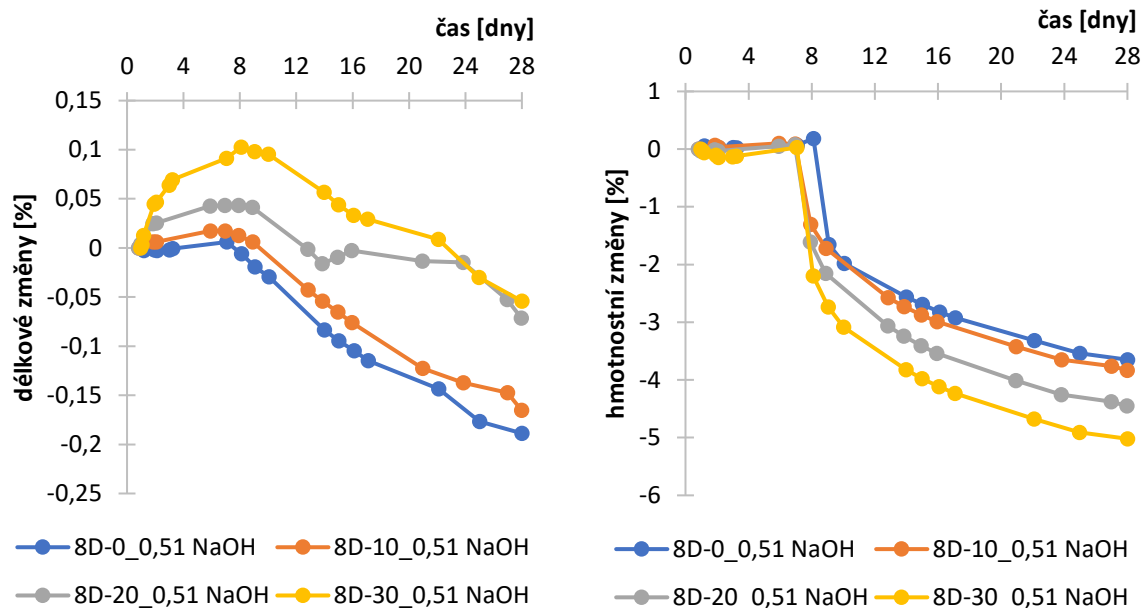
Obr. 50: Vliv bypassových cementářských odprašků na hmotnostní změny při vysychání na vzduchu

Délkové změny betonů

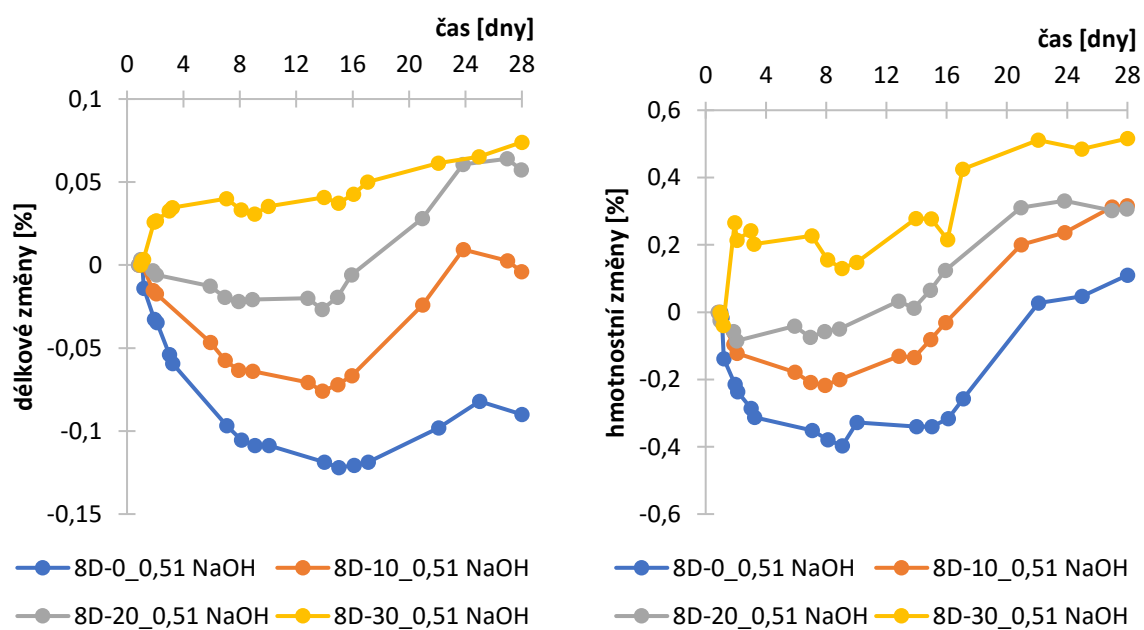
Při uložení ve vodě s rostoucí dávkou odprašků roste expanze vzorků (Obr. 51, Obr. 52). Po vytažení na vzduch se sice všechny vzorky smršťují, ale díky zmiňované expanzi při uložení ve vodě dochází s rostoucí dávkou odprašků ke snižování celkového smrštění těchto vzorků. Při uložení ve vlhkostní komoře (Obr. 53) byl očekáván obdobný trend, avšak k expanzi došlo v prvních dnech pouze u vzorku s 30 % odprašků. Důvodem bylo patrně to, že u ostatních vzorků docházelo k částečnému vysychání, což je patrné i z vývoje hmotnostních změn. Po 14 dnech došlo k expanzi u všech vzorků, protože byly v komoře z důvodu nedostatku místa přerovnány a dostaly se do míst s vyšší vlhkostí, což opět dokládá vývoj hmotnostních změn. Tomuto jevu bohužel s ohledem na konstrukci komory a jejímu vytížení nebylo možné předejít, nicméně i přesto je zřejmé, že s rostoucí dávkou odprašků se snižuje smrštění, resp. dochází k čím dál větší expanzi. Při uložení ve vlhkostní komoře po dobu 6 dní (Obr. 54) došlo také k expanzi vzorku s 30 % odprašků, poté u všech vzorků došlo ke smrštění. Protože při uložení ve vlhkostní komoře nedošlo k expanzi, jen k mírnému zpomalení smrštění, je výsledné smrštění podobné jako při uložení na vzduchu. Zvyšující se dávka odprašků vedla ke snížení smrštění. Při vysychání na vzduchu (Obr. 55) docházelo ke smrštění, které bylo největší u reference a zvyšující se dávka odprašků měla za následek snížení smrštění. Hmotnostní úbytky byly u všech vzorků stejné. V autogenních podmínkách měl největší smrštění vzorek s 30 % odprašků a nejmenší s 20 % odprašků.



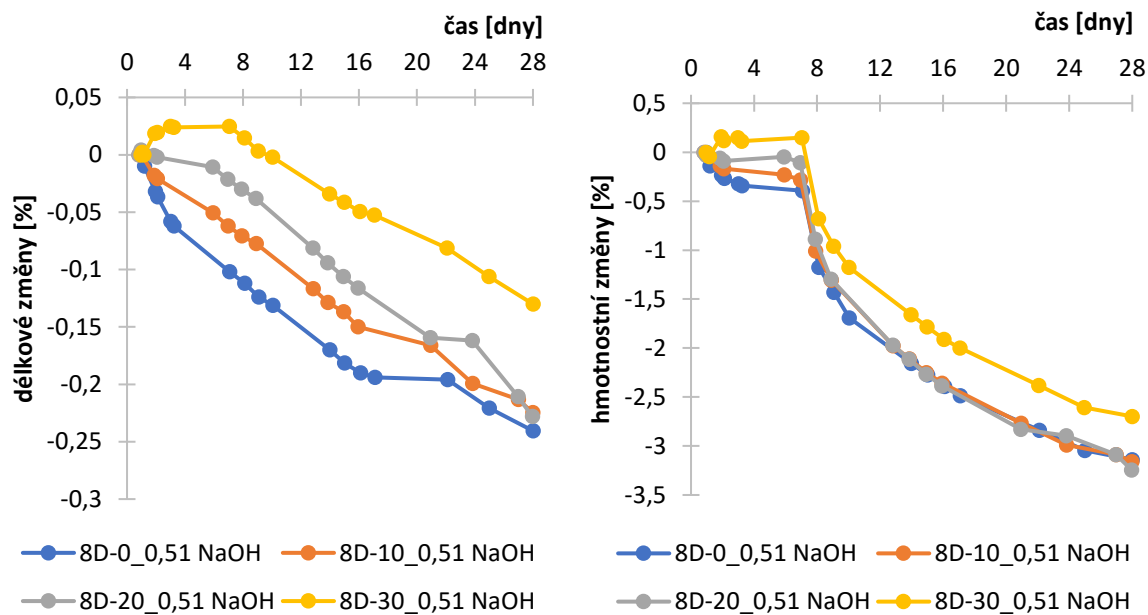
Obr. 51: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové a hmotnostní změny při uložení ve vodě



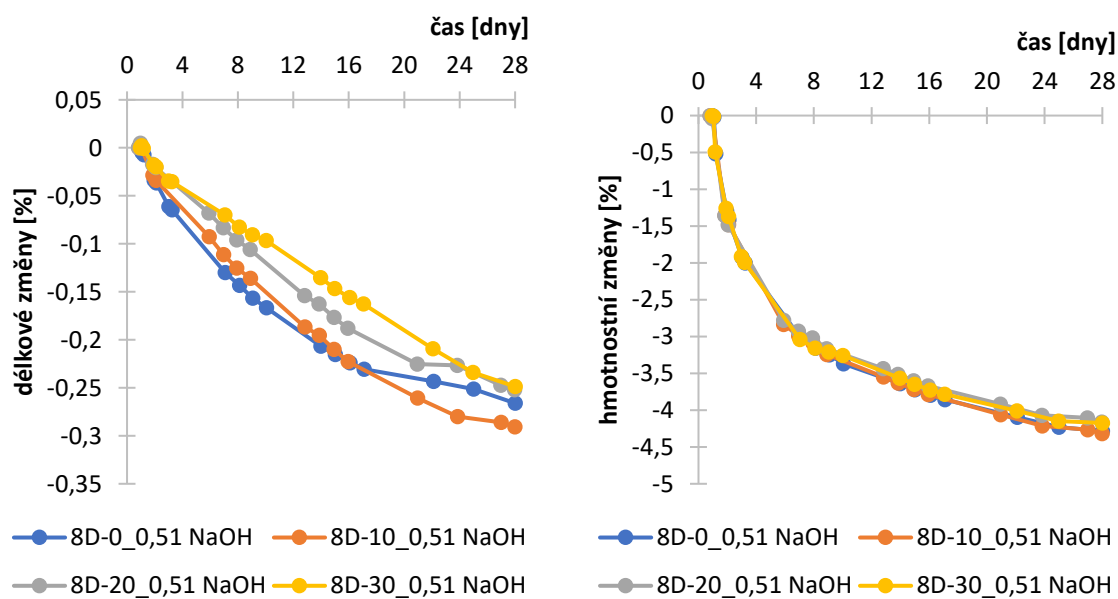
Obr. 52: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové a hmotnostní změny při uložení ve vodě po dobu 6 dní



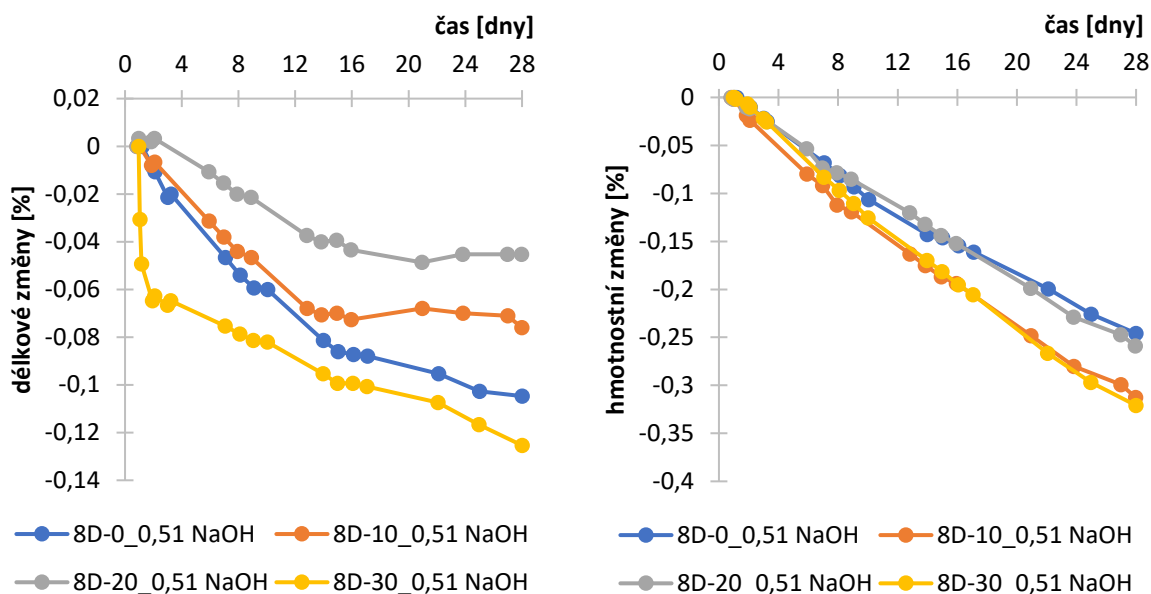
Obr. 53: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové a hmotnostní změny při uložení ve vlhkostní komoře



Obr. 54: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové a hmotnostní změny při uložení ve vlhkostní komoře po dobu 6 dní



Obr. 55: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové a hmotnostní změny při vysychání na vzduchu

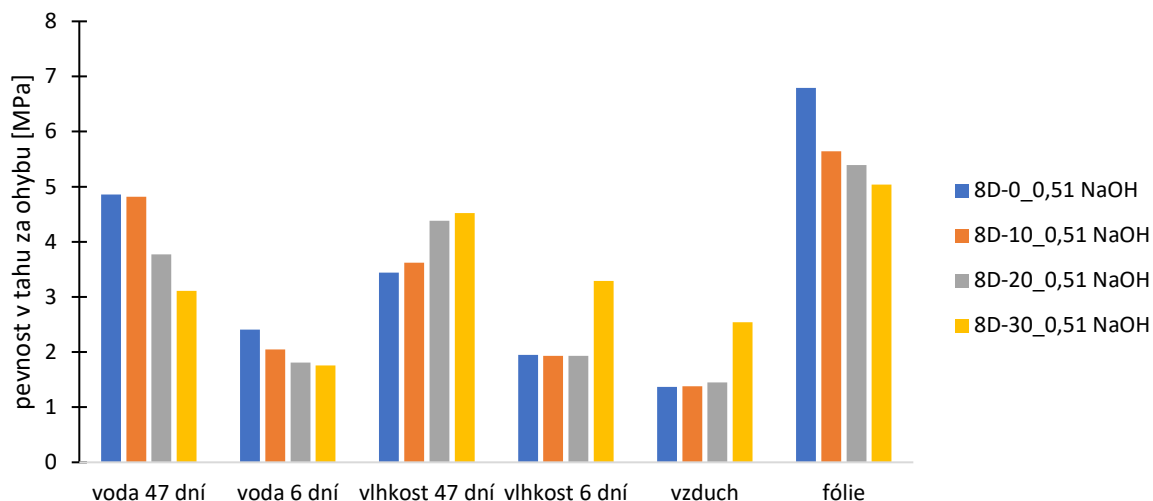


Obr. 56: Vliv bypassových cementářských odprašků na délkové a hmotnostní změny v autogenních podmínkách

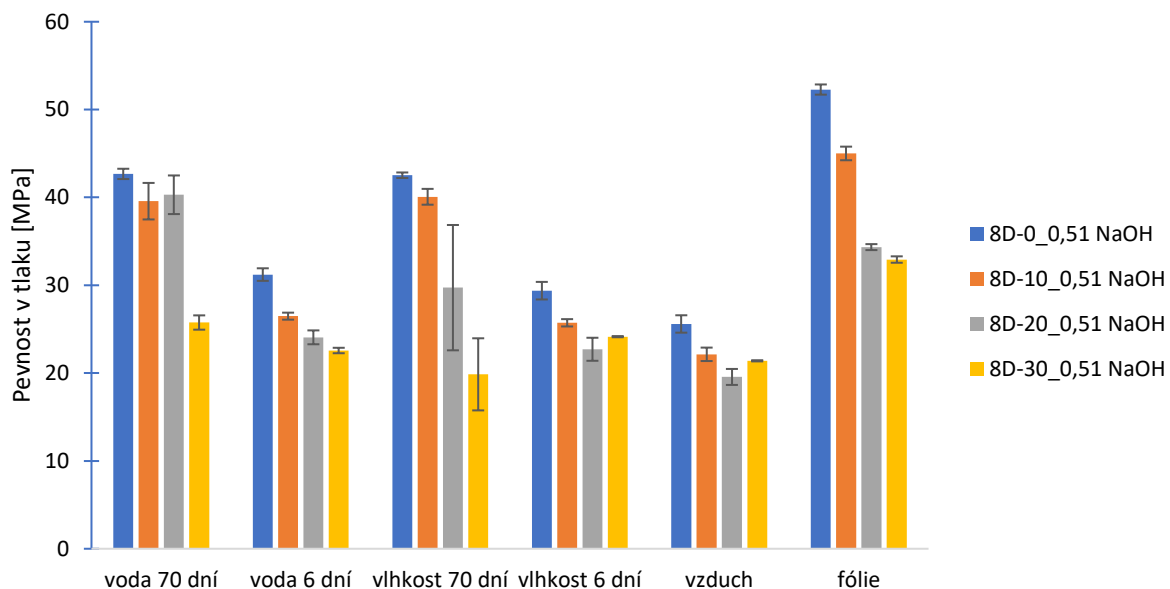
Pevnost v tahu za ohybu a v tlaku

Pevnost v tahu za ohybu a tlaku byla měřena ve stáří 82 dní. Trámečky, které byly po dobu měření smrštění ve vodě a ve vlhkostní komoře, byly po 47 dnech vyndány na vzduch.

Pevnost v tahu za ohybu klesá s rostoucí dávkou odprašků při uložení ve vodě, ve vodě po dobu 6 dní a ve fólii (Obr. 57). Při uložení ve vlhkosti, vlhkosti po dobu 6 dní a na vzduchu byla nejlepší pevnost v tahu za ohybu naměřena u vzorků s 30 % odprašků. Pevnosti v tlaku se snižovaly s rostoucím množstvím odprašků (Obr. 58). Pevnost v tahu za ohybu i pevnost v tlaku je nejlepší u vzorků ošetřovaných po dlouhou dobu ve vodě, vlhkostní komoře nebo autogenních podmínkách, neboť zde jednak nedochází k tak výrazným objemovým změnám a jinak mohou hydratační reakce v těchto prostředích probíhat dlouhodobě. Pokles pevností s rostoucí dávkou odprašků je dán tím, že je odprašky nahrazována struska, a proto se nemůže tvořit CSH v takovém rozsahu.



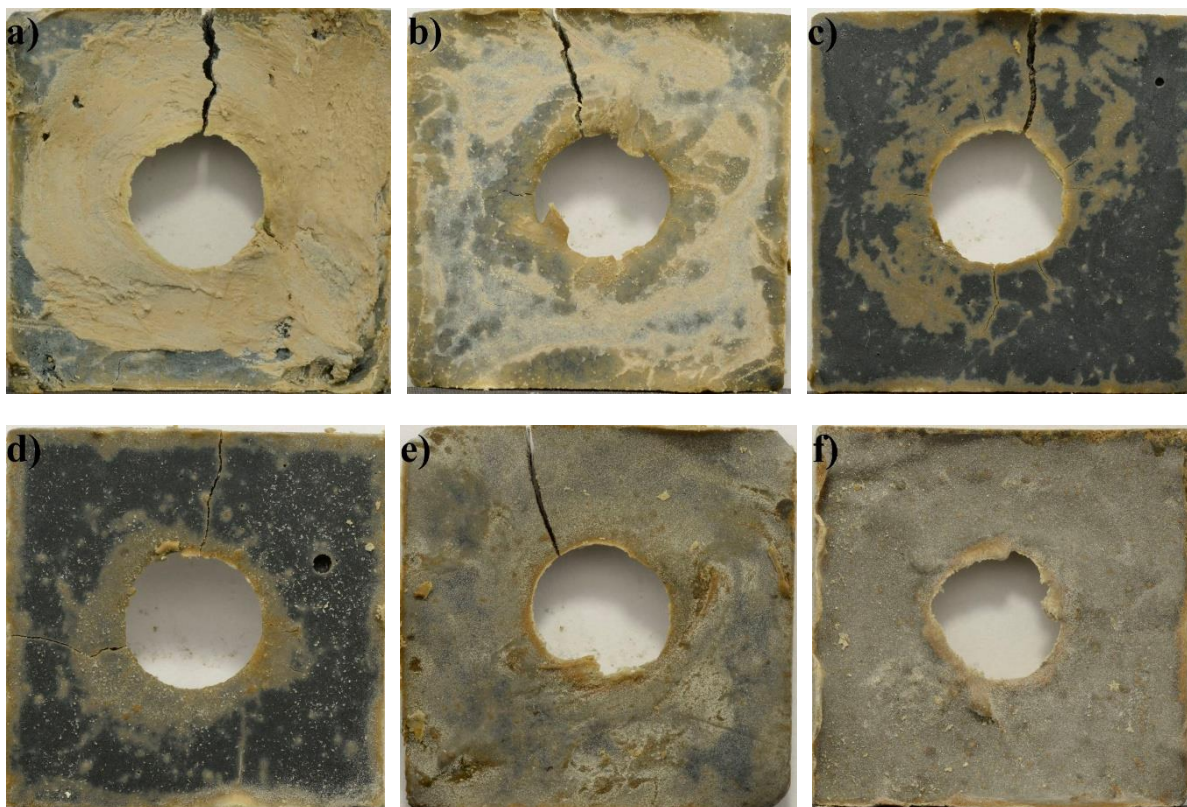
Obr. 57: Vliv bypassových cementářských odprašků na pevnost v tahu za ohybu (všechny vzorky zkoušeny ve stáří 82 dní)



Obr. 58: Vliv bypassových cementářských odprašků na pevnost v tlaku (všechny vzorky zkoušeny ve stáří 82 dní)

Trhliny

Trhliny byly pozorovány na pastách ve formě na praskání (Obr. 59). Jediný vzorek, který nepopraskal, byl vzorek se 60 % odprašků, tedy nejvyšší možné dávce odprašků pro tento systém. Toto je v souladu s dříve popisovanými trendy při aktivaci pouze vodním sklem.

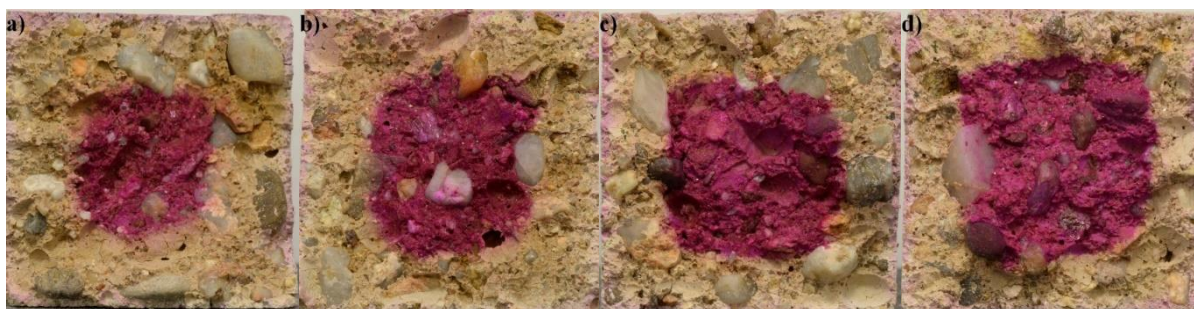


Obr. 59: Vliv bypassových cementářských odprašků na vznik trhlin a) 8D-0_0,35 NaOH; b) 8D-10_0,35 NaOH; c) 8D-20_0,35 NaOH; d) 8D-30_0,35 NaOH; e) 8D-40_0,35 NaOH; f) 8D-60_0,35 NaOH

Číselné vyhodnocení prasklin na betonových trámečcích bohužel nebylo možné. Protože byly vzorky namíchané do ocelových forem a jejich povrch obrazovou analýzu neumožňoval.

Karbonatace

Stejně jako v předchozích případech vedla zvyšující se dávka odprašků ke snížení karbonatace (Obr. 60).



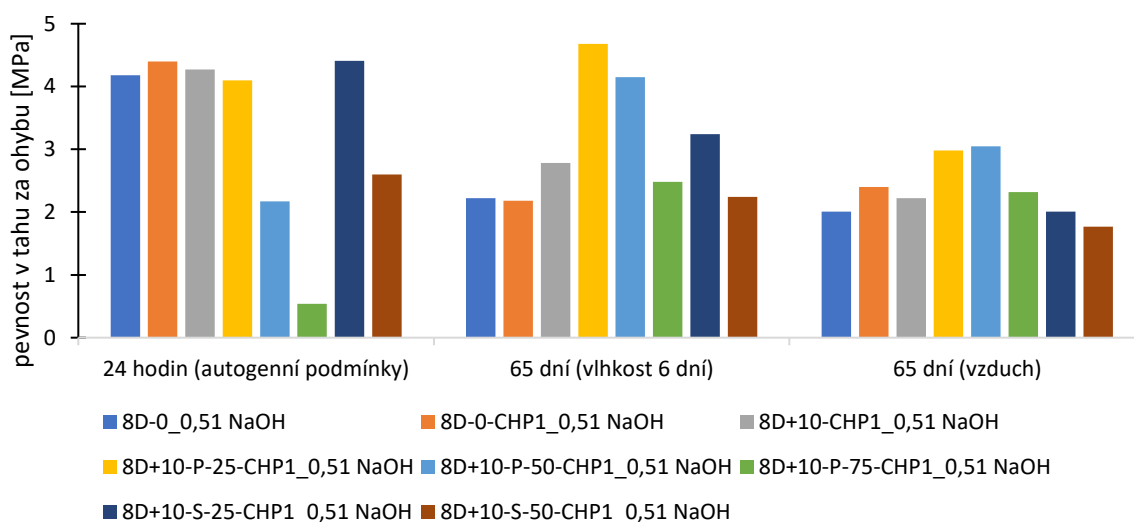
Obr. 60: Vliv bypassových cementářských odprašků na karbonataci při vysychání na vzduchu a) 8D-0_0,46 NaOH; b) 8D-10_0,46 NaOH; c) 8D-20_0,46 NaOH; d) 8D-30_0,46 NaOH,

4.5 Směsi s dalšími příměsmi

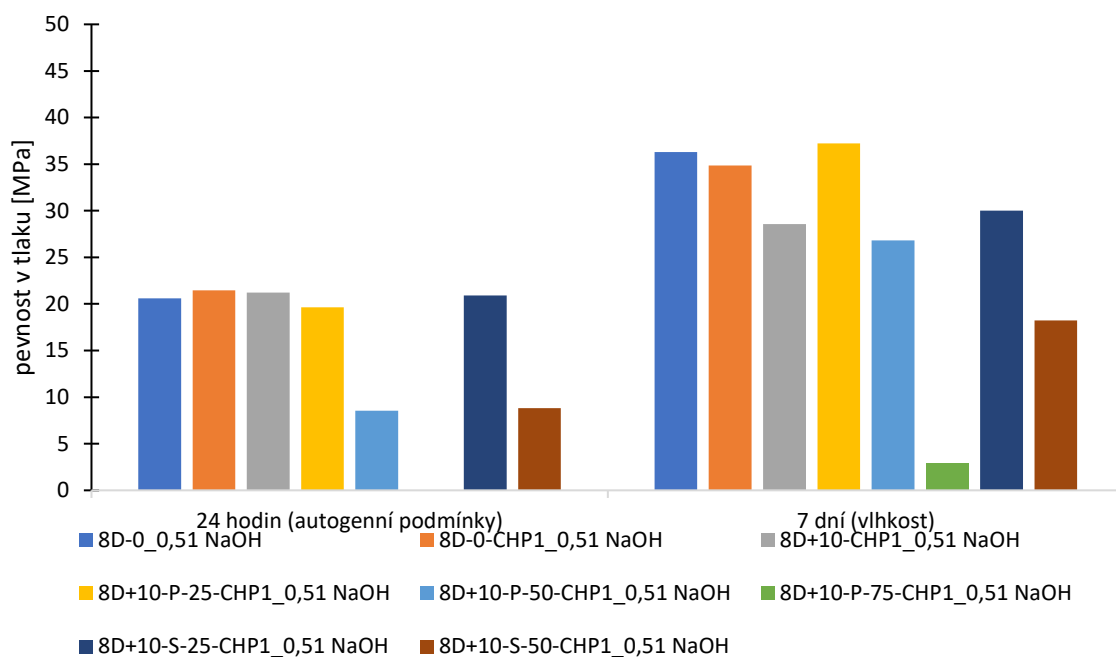
Na základě předchozích výsledků byly připraveny další směsi, u kterých byla sledována tendence ke vzniku trhlin. Byly použity směsi s 8 % Na_2O , 10 % odprašků, které nahrazovaly kamenivo, z důvodu dříve popisovaného pozitivního vlivu na růst pevností. Křemičitý modul byl přídatkem NaOH snížen na hodnotu 0,5, jelikož u vzorků s tímto křemitým modulem docházelo k nižšímu smrštění. Byl zvolen vodní součinitel 0,51. Pro zlepšení zpracovatelnosti byl použit plastifikátor (CHRYSO®Plast 461, 1 % vůči strusce). Struska byla nahrazována vysokoteplotním popílkem (v názvu vzorku P) z elektrárny v Počeradech, nebo speciálně umletým křemenem (S) za účelem snížení jejího obsahu ve směsi, což by mohlo vést k redukci trhlin.

Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

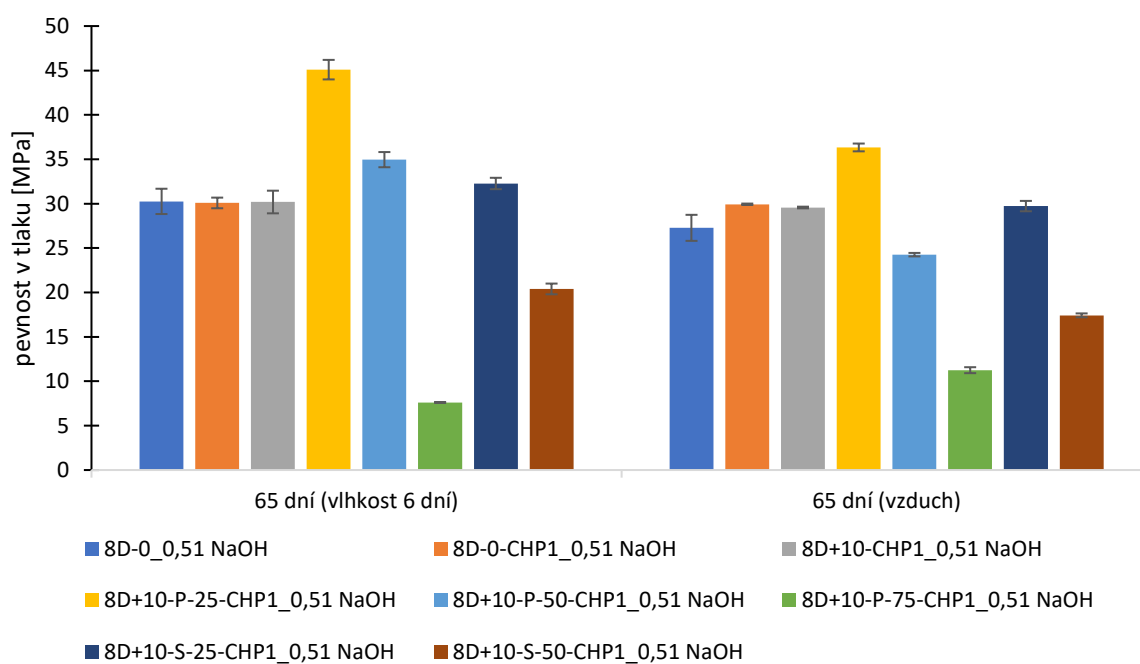
V pevnostech v tlaku a tahu za ohybu (Obr. 61, Obr. 62, Obr. 63) nejsou mezi referenčním vzorkem, vzorkem s odpraškou a vzorkem s odpraškou a plastifikátorem velké rozdíly bez ohledu na jejich stáří. Pevnosti v ohybu u těchto vzorků byly největší po 24 hodinách v autogenních podmínkách. Ošetřování u těchto vzorků nemá velký vliv na výsledné pevnosti v tahu za ohybu ani v tlaku. Přídavek 25 % popílku vedl ke zvýšení pevností vůči referenci, výraznějšího rozdílu bylo dosaženo u hodnot měřených po 65 dnech. Ošetřování ve vlhkosti vedlo u vzorků s 25 % a 50 % popílku ke zvýšení hodnot pevností. Zvyšující se dávka popílku vedla k značné ztrátě pevností, u vzorku s 75 % nebyla pevnost v tlaku po 24 hodinách vůbec naměřena. Pevnosti vzorku s 25 % speciálně umletého křemene se výrazně nelišily od reference, zvýšení dávky na 50 % vedlo ke snížení pevností.



Obr. 61: Pevnosti v tahu za ohybu



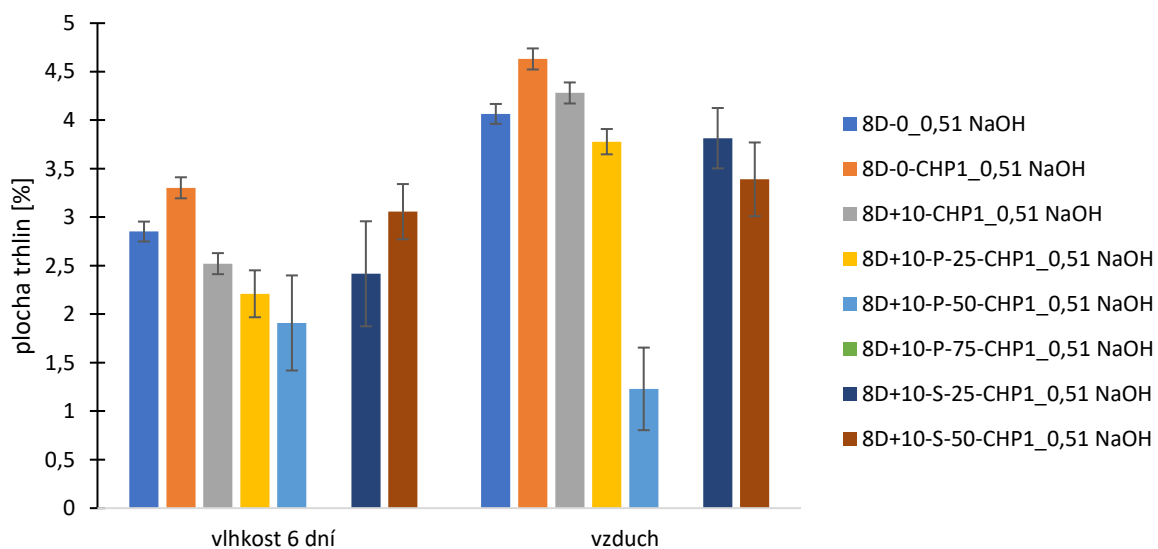
Obr. 62: Pevnosti v tlaku po 24 hodinách a 7 dnech



Obr. 63: Pevnosti v tlaku po 65 dnech

Trhliny

Stejně jako v předchozích případech mělo ošetřování pozitivní vliv na množství vzniklých trhlin (Obr. 64). Přídavek plastifikátoru vedl k mírnému zvýšení množství trhlin. Při nahrazení 25 % strusky popílkem nedochází vůči referenci k velkým rozdílům. Další přídavek popílku vede ke snížení plochy trhlin až na nulovou hodnotu u vzorku se 75 % popílku, tento vzorek měl ale vůči ostatním vzorkům nejhorší pevnosti v tlaku (Obr. 62, Obr. 63). U popílku tedy dochází s poklesem pevnosti k poklesu množství trhlin. Speciálně umletý křemen způsobil při uložení na vzduchu velmi mírný pokles množství trhlin vůči referenci.



Obr. 64: Vliv příměsí na plochu trhlin

5 ZÁVĚR

V této práci byl sledován vliv bypassových cementářských odprašků na vlastnosti alkalicky aktivované strusky. Hlavní sledovanou vlastností byla tendence ke vzniku trhlin, dále byly stanovovány pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku, délkové změny a míra karbonatace.

Bylo zjištěno, že pro pozorování vzniku trhlin u past je vhodné použít ocelovou formu s trnem uprostřed, kde nedochází k zavírání trhlin v čase jako u běžných trámečků. Pro pozorování trhlin u betonových směsí byly jako nejvhodnější vyhodnoceny trámečky připravované do plastových forem, protože zde odpadá nutnost vymazávání a formy mají hladký povrch. Díky tomu je u trámečků z těchto forem možné vyhodnotit množství trhlin pomocí obrazové analýzy.

S tvorbou trhlin úzce souvisí délkové změny vzorků, u kterých, jak bylo pozorováno, hraje zcela zásadní roli typ ošetřování a uložení. Konkrétně bylo zjištěno, že přídavek bypassových cementářských odprašků při uložení vzorků ve vodě nebo vlhkostní komoře způsobuje expanzi, velikost expanze je závislá na množství odprašků a s jejich přídavkem roste. Tím je možné pomocí odprašků výrazně snížit celkové smrštění při následném vysychání. Pokud jsou vzorky po 24 hodinách přesunuty přímo na vzduch (bez ošetřování ve vodě/vlhkosti), rostoucí dávka odprašků naopak smrštění zvyšuje. Při použití vodního skla s nižším křemičitým modulem došlo k snížení smrštění při vysychání na vzduchu a ke zvětšení expanze při uložení ve vodě. V tomto případě se dokonce při vysokých dávkách odprašků vzorky ve vodním uložení vlivem expanze rozlámaly.

Na tvorbu trhlin má velký vliv ošetřování. Dlouhodobé ošetřování ve vodě a ve vlhkostní komoře vedlo k výraznému potlačení tvorby trhlin. Ošetřování po dobu 6 dní také vede ke snížení množství trhlin, ale ne tak výraznému. Tvorbu trhlin také výrazně snižuje rostoucí dávka odprašků, a to jak při náhradě strusky, tak při náhradě kameniva. Přítomnost odprašků také vede ke snížení hloubky karbonatace.

V případě, že byly do směsí přidány odprašky jako náhrada za strusku, docházelo ke snížení pevností v tahu za ohybu a v tlaku. Jako lepší možnost se jeví přidání odprašků místo části kameniva, u těchto vzorků docházelo k nárůstu pevností.

Proto byly pro závěrečné experimenty vybrány vzorky s použitím odprašků jako náhrady kameniva. Dále zde byl hydroxidem sodným snížen křemičitý modul aktivátoru na hodnotu 0,5, protože zde ve srovnání s neupraveným křemičitým modulem docházelo k menšímu smrštění. Na takových směsích bylo snahou tvorbu trhlin dále snížit omezením obsahu strusky, konkrétně vysokoteplotním popílkem a speciálně upraveným křemenem. Zejména rostoucí dávka popílku množství trhlin výrazně snižovala, avšak za současného poklesu mechanických vlastností. Snahou navazujícího výzkumu tedy bude upravit složení směsí tak, aby při snižování množství trhlin k poklesu mechanických vlastností nedocházelo.

6 POUŽITÉ ZDROJE

- [1] BOHÁČOVÁ, Jana, Stanislav STANĚK a Martin VAVRO. Possible Applications of Alkali-Activated Systems in Construcion Možnosti Aplikace Alkalicky Aktivovaných Systémů Ve Stavebnictví. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series* [online]. 2012, **12**(2), 8-17 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.2478/v10160-012-0012-8. ISSN 1804-4824. Dostupné z: <https://content.sciendo.com/view/journals/tvsb/12/2/article-p8.xml>
- [2] VLČEK, Jozef a Jiří FIEDOR. *Průmyslové odpady: strusky z výroby železa a oceli*. Ostrava: ECOFER, 2015. Tech-link : moduly pro oblast dalšího vzdělávání. ISBN 978-80-260-7775-6.
- [3] OGE, Mecit, Dervis OZKAN, M.Bahattin CELIK, Mustafa SABRI GOK a Abdullah CAHIT KARAOGLANLI. An Overview of Utilization of Blast Furnace and Steelmaking Slag in Various Applications. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2019, **11**, 516-525 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.01.023. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785319300239>
- [4] AĚTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [5] SHI, Caijun, P. V. KRIVENKO a D. M. ROY. *Alkali-activated cements and concretes*. New York, 2006. ISBN 978-041-5700-047.
- [6] PAN, De'an, Lili LI, Xi TIAN, Yufeng WU, Na CHENG a Hailiang YU. A review on lead slag generation, characteristics, and utilization. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2019, **146**, 140-155 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.03.036. ISSN 09213449. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344919301442>
- [7] YI, Huang, Guoping XU, Huigao CHENG, Junshi WANG, Yinfeng WAN a Hui CHEN. An Overview of Utilization of Steel Slag. *Procedia Environmental Sciences* [online]. 2012, **16**, 791-801 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.10.108. ISSN 18780296. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1878029612006469>
- [8] JIŘÍČKOVÁ, Milena a Martin KEPPERT. *Chemie: chemie stavebních materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04237-3.
- [9] ŽIŽKOVÁ, Markéta. ŘSD: Za zvlnění dálnice D47 může Eurovia, máme důkaz. In: *Aktuálně.cz* [online]. Economia, c1999-2019, 21. 3. 2012 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/domaci/rsd-za-zvlneni-dalnice-d47-muze-eurovia-mame-dukaz/r~i:article:738085/>
- [10] ŠAUMAN, Zdeněk. *Maltoviny I*. Brno: PC-DIR, 1993. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0509-0.
- [11] ANTOŠ, Petr a Alois BURIAN. *Vodní sklo: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Ústí nad Labem: SILCHEM, 2002. ISBN 80-238-9515-X.
- [12] DENG, Zhizhong, Wen ZHOU, Hong YUE a Xiaoyang GUO. Study on the hydration mechanism of a hardened slag-based plugging agent activated by alkalis. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, **203**, 343-355 [cit. 2019-05-11]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.015. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819300157>

- [13] GARCÍA-LODEIRO, I., A. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ a A. PALOMO. Variation in hybrid cements over time. Alkaline activation of fly ash–portland cement blends. *Cement and Concrete Research* [online]. 2013, **52**, 112-122 [cit. 2019-05-20]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.03.022. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884613001221>
- [14] *Analýza přechodu komunálního odpadu (skupina 20 Katalogu odpadů) na palivo z odpadu* [online]. Ernst & Young Audit, 2015 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/\\$FILE/ODP-4_6_MZP_FIN-20160810.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/$FILE/ODP-4_6_MZP_FIN-20160810.pdf)
- [15] MALÁŠEK, Jiří. By-pass rotační cementářské pece. In: *Stavební technika* [online]. Vega spol. s r.o., 2019, 2007 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/by-pass-rotacni-cementarske-pece>
- [16] NOVÁK, Miroslav. *Zkušenosti s bypassy pecních linek v cementárně Radotín* [online]. In: . 2008, s. 15 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/07/sd2008-prednaska-mn-bypass-radotin.pdf>
- [17] BOHUNĚK, Jan. *Provozní zkušenosti s bypassy plynů pecních linek v Českomoravský cement, a.s., závod Radotín* [online]. In: . 2012, s. 31 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.vumo.cz/wp-content/uploads/2015/05/provozni-zkusenosti-s-bypassy-plynu-pecnich-linek-v-ceskomoravsky-cement-a-s-zavod-radotin.pdf>
- [18] HUDOBA, Igor. *Vysokohodnotný betón: materiály, vlastnosti, výroba, využitie*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2008. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-2836-2.
- [19] MATAKHA, Faris, Yaser JARADAT a Parviz SOROUSHIAN. Plastic shrinkage cracking and bleeding of concrete prepared with alkali activated cement. *Heliyon* [online]. 2019, **5**(4) [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01514. ISSN 24058440. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844018388704>
- [20] BALLEKERE KUMARAPPA, Darshan, Sulapha PEETHAMPARAN a Margueritte NGAMI. Autogenous shrinkage of alkali activated slag mortars: Basic mechanisms and mitigation methods. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **109**, 1-9 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.04.004. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884617308086>
- [21] BERNAL, Susan A., Ruby Mejía DE GUTIERREZ, John L. PROVIS a Volker ROSE. Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags. *Cement and Concrete Research* [online]. 2010, **40**(6), 898-907 [cit. 2019-05-12]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.02.003. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884610000323>
- [22] MASTALI, M., P. KINNUNEN, A. DALVAND, R. MOHAMMADI FIROUZ a M. ILLIKAINEN. Drying shrinkage in alkali-activated binders – A critical review. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **190**, 533-550 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.125. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818323043>
- [23] MIHASHI, Hirozo a João Paulo de B. LEITE. State-of-the-Art Report on Control of Cracking in Early Age Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004, , 14. Dostupné také z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/2/2/2_2_141/_pdf/-char/en

- [24] AYDIN, Serdar. A ternary optimisation of mineral additives of alkali activated cement mortars. *Construction and Building Materials* [online]. 2013, **43**, 131-138 [cit. 2019-05-12]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.005. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813001049>
- [25] MATAKHA, Faris, Talal SALEM, Mamoon SHAAFAEY a Parviz SOROUSIAN. Drying shrinkage of alkali activated binders cured at room temperature. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, **201**, 563-570 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.223. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818332215>
- [26] NGUYỄN, Huy Hoàng, Jeong-Il CHOI, Keum-Il SONG, Jin-Kyu SONG, Jungwon HUH a Bang Yeon LEE. Self-healing properties of cement-based and alkali-activated slag-based fiber-reinforced composites. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **165**, 801-811 [cit. 2019-05-20]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.023. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818300230>
- [27] KANAVARIS, Fragkoulis, Miguel AZENHA, Marios SOUTSOS a Konstantin KOVLER. Assessment of behaviour and cracking susceptibility of cementitious systems under restrained conditions through ring tests: A critical review. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2019, **95**, 137-153 [cit. 2019-05-22]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.10.016. ISSN 09589465. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946518301215>
- [28] Shrinkage Ring - Measuring the Restrained Shrinkage. *Qualitest* [online]. 2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.worldoftest.com/shrinkage-ring-measuring-restrained-shrinkage>